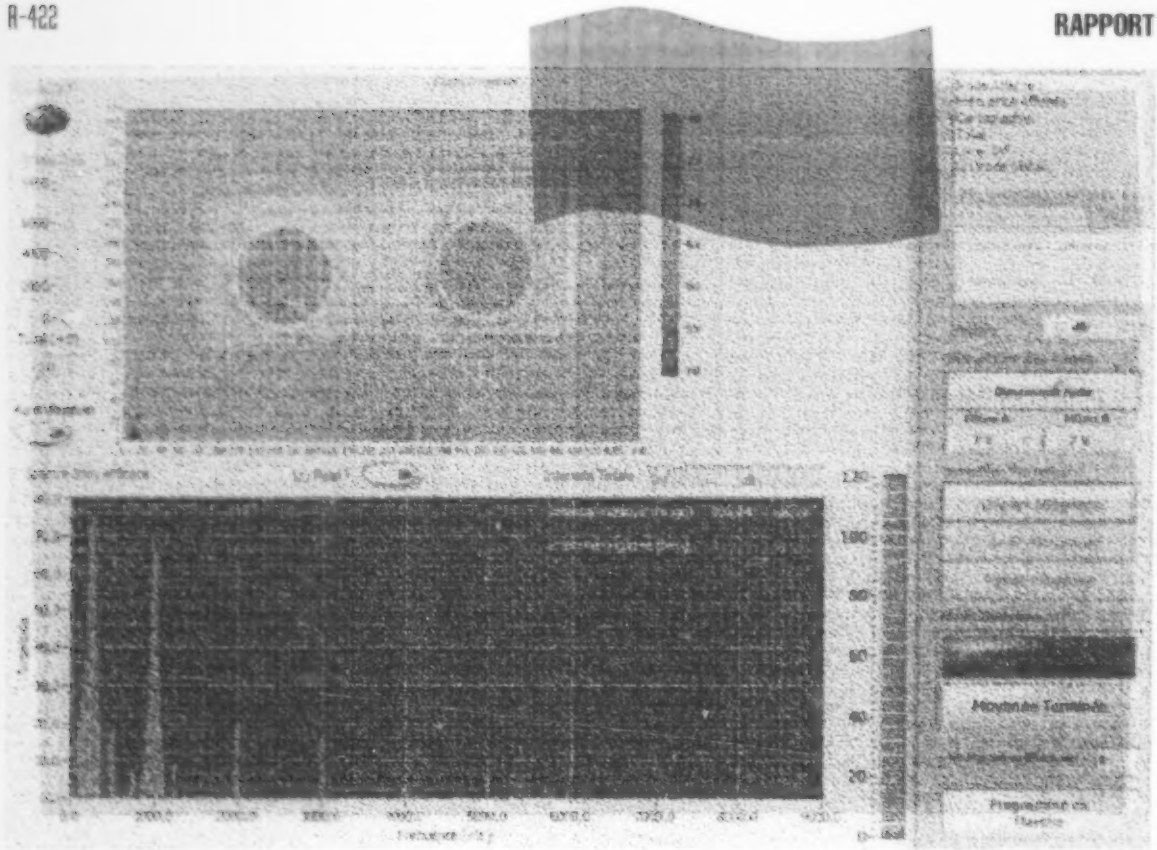
Conception d'un intensimètre économique et évaluation préliminaire d'un nouveau concept de repérage spatial pour la réalisation de cartographie d'intensité acoustique

ÉTUDES ET RECHERCHES

Michel Pearson
André L'Espérance

R-422

RAPPORT



irsst

105-06420/

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, juin 2005

Conception d'un intensimètre économique et évaluation préliminaire d'un nouveau concept de repérage spatial pour la réalisation de cartographie d'intensité acoustique

Michel Pearson et André L'Espérance
Faculté de génie, Département de génie mécanique,
Université de Sherbrooke

ÉTUDES ET RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Sommaire

Le défi proposé dans ce projet de recherche est de rendre l'intensimétrie acoustique accessible pour les intervenants en acoustique. Cet instrument permet de quantifier la puissance acoustique des sources pour parvenir à un plan d'intervention en acoustique efficace. Les contraintes majeures qui limitent l'utilisation de ce type d'appareil se situent au niveau du coût (plus de 30 000 $) et de la complexité d'utilisation. L'appareil développé dans le cadre de ce projet utilise des technologies moins onéreuses combinées à des corrections physiques et logicielles. Le niveau de performance obtenue est amplement suffisant pour le diagnostic acoustique en industrie. De plus, le couplage d'un système de repérage à l'intensimètre permet d'évaluer une cartographie du rayonnement acoustique d'un plan balayé dans l'espace. La mesure d'intensité devient alors beaucoup plus intuitive pour l'utilisateur et le niveau de puissance acoustique est automatiquement calculé par l'équipement.

Table des matières

1. CONTEXTE **1**

2. OBJECTIFS **2**

3. MÉTHODOLOGIE **2**

4. THÉORIE SUR L'INTENSIMÉTRIE **3**

4.1 DÉFINITION GÉNÉRALE DE L'INTENSITÉ 3
4.2 COMMENT L'ÉQUATION D'INTENSITÉ EST EXPRIMÉE EN TRAITEMENT DU SIGNAL 3

5. DÉVELOPPEMENT MATÉRIEL **4**

5.1 CHOIX DU DSP 4
5.2 CHOIX DES MICROS 5
5.3 PRÉAMPLIFICATEURS 6
5.4 USINAGE DES PROTOTYPES DE SONDE D'INTENSITÉ 7
5.5 SÉLECTION DU SYSTÈME DE REPÉRAGE 9

6. IMPLANTATION DE L'ANALYSEUR SUR SUPPORT DSP **11**

7. DÉVELOPPEMENT DE L'INTERFACE CONVIVIALE **11**

7.1 PROGRAMME PRINCIPAL D'INTENSIMÉTRIE 11
7.2 MODULE DE CARTOGRAPHIE ACOUSTIQUE 13
7.3 SOUS-PROGRAMME DE CALIBRATION EN AMPLITUDE DES MICROPHONES 14
7.4 SOUS-PROGRAMME CALIBRATION EN AMPLITUDE ET EN PHASE AUTOMATISÉE 15

8. RÉSULTATS **16**

8.1 CORRECTION DE PHASE AUTOMATISÉE 16
8.2 CORRECTION DE LA DIFFRACTION 22
8.3 VALIDATION DES MESURES AVEC L'INTENSIMÈTRE 25
8.3.1 Mesures d'intensité 25
8.3.2 Résumé de la validation 32
8.4 CARTOGRAPHIE 33

9. AVANTAGES ET LIMITATIONS **36**

10. RETOMBÉES **36**

11. CONCLUSION **37**

12. PERSPECTIVES **38**

BIBLIOGRAPHIE **39**

ANNEXE A SURVOL DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE **41**

ANNEXE B PERTURBATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE AVEC FOB **45**

1. CONTEXTE

Le bruit est un problème important relié à la santé au travail. Le manque d'instruments et d'outils d'analyse efficaces est un des aspects qui rend souvent l'analyse et la mise en œuvre de programmes d'intervention difficiles à réaliser. Une des difficultés que peuvent rencontrer les intervenants en bruit est l'évaluation de la puissance acoustique des sources. L'intensimétrie acoustique est une des seules méthodes standardisées permettant une évaluation précise de la puissance acoustique de sources.

Par définition, l'intensité acoustique est la mesure de la puissance et de la direction du bruit rayonné sur une surface virtuelle. La Figure 1 illustre un champ d'intensité sonore rayonnée à partir d'une source de bruit ponctuelle. L'énergie se propage à la manière d'une enveloppe à la vitesse du son. La surface de l'enveloppe augmente d'un facteur 4 par doublement de distance r. Ainsi, l'intensité acoustique diminue en fonction de la distance par rapport à la source alors que la puissance de la source ponctuelle demeure constante.

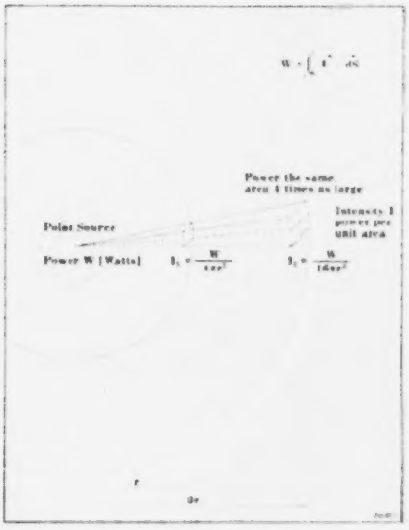


Figure 1 : Représentation du champ d'intensité émis par une source ponctuelle (source : [6])

Un des avantages à l'utilisation de l'intensité acoustique est de pouvoir déterminer les puissances des sources même dans un environnement bruyant. En effet, en connaissant la direction de propagation de l'énergie acoustique, on parvient à identifier l'intensité qui provient spécifiquement de la source visée en effectuant une mesure moyenne autour de la dite source. Par cette approche, on réussit à identifier les sources problématiques dans un environnement bruyant.

Les inconvénients majeurs rencontrés actuellement avec l'intensimètre sont :

- Le coût des équipements (plus de 30 000 $);
- Le besoin de connaissance des phénomènes de propagation pour une utilisation adéquate de l'appareil;
- Les équipements actuels possèdent une interface non conviviale.

En ce qui concerne les méthodes de cartographie acoustique, il existe quatre méthodes identifiées sur le marché mondial et/ou présentées dans des articles scientifiques. Ces différentes méthodes sont décrites brièvement à l'annexe A.

Le principal problème de ces méthodes est lié à l'utilisation en milieu industriel. En effet, le manque de flexibilité, lors des manipulations, confine la plupart de ces méthodes aux mesures *in situ* en laboratoire. L'autre obstacle majeur est lié au coût défrayé pour chacune de ces technologies. L'équipement commercial le moins onéreux se vend environ 100 000 $ CAN. Ces contraintes limitent très rapidement l'accès des équipements de cartographie aux intervenants en acoustique en milieu industriel.

2. OBJECTIFS

Les deux objectifs principaux du projet de recherche sont :

1. Conception d'un intensimètre économique basé sur la technologie des cartes DSP;
2. Évaluation préliminaire d'un nouveau concept de repérage spatial en vue de la réalisation de cartographie d'intensité acoustique.

3. MÉTHODOLOGIE

Voici le cheminement suivi pour l'élaboration du projet de cartographie d'intensité acoustique :

1. Appropriation des concepts scientifiques reliés à cette technologie;
2. Implantation d'un analyseur sur un support DSP (digital signal processing) pour l'acquisition et le traitement du signal;
3. Développement d'une méthode de correction de phase automatisée;
4. Correction des phénomènes de diffraction[1] autour des microphones;
5. Mise en place d'une interface conviviale sur ordinateur;
6. Exploration d'une méthode de repérage spatial pour la cartographie d'intensité acoustique;
7. Intégration du système de positionnement au système d'intensimétrie.

Le projet s'inscrit dans le cadre de la maîtrise de Michel Pearson, étudiant en génie électrique à l'Université Laval. Une partie théorique de la formation s'est déroulée à l'université de Sherbrooke au département de génie électrique et de mécanique. Le projet a été réalisé en collaboration avec Soft dB inc. et le laboratoire d'études aérodynamiques de l'Université Poitiers en France. Ces deux institutions ont contribué à la fourniture de matériel et d'expertise assurant le bon déroulement du projet.

[1] Diffraction : Transformation des surfaces d'onde et modification de la répartition de l'énergie dues à la présence d'un obstacle situé sur le trajet de l'onde acoustique.

4. THÉORIE SUR L'INTENSIMÉTRIE

4.1 Définition générale de l'intensité

La pression acoustique $p\ (M,t)$ est la variation de pression entre la pression instantanée totale du fluide $P_{totale}\ (M,t)$ et la pression moyenne (statique) $\overline{p}\ (M)$ à un point arbitraire M. La vitesse particulaire à un point M, exprimée $u_n\ (M,t)$, est la vitesse matérielle des oscillations d'un fluide causées par le phénomène sonore où la direction n peut être définie de façon spatiale en x, y et z. Le vecteur d'intensité acoustique complexe instantanée $c_n\ (M,t)$, au point M et à l'instant t, est définie par la relation :

$$c_n(M,t) = p(M,t)\,u_n(M,t) \tag{4.1}$$

Cette formulation de l'intensité acoustique pose problème. Il est relativement facile de mesurer la pression acoustique, mais la mesure directe de la vitesse particulaire est beaucoup plus difficile à évaluer.

4.2 Comment l'équation d'intensité est exprimée en traitement du signal

Avec l'arrivée des analyseurs FFT (Fast Fourier Transform) sur le marché, plusieurs avancées majeures ont été faites en traitement du signal. Dans le cas qui nous concerne, les acousticiens ont développé une nouvelle formulation de l'équation (4.1) pour permettre la mesure d'intensité à partir uniquement de deux microphones de pression.

À la Figure 2, on peut observer la configuration des microphones de pression pour la mesure d'intensité sur un plan dans la direction x. Les chercheurs ont voulu évaluer l'intensité au point M avec des approximations de différences finies. Ces approximations permettent d'évaluer la pression acoustique et la vitesse particulaire au point M.

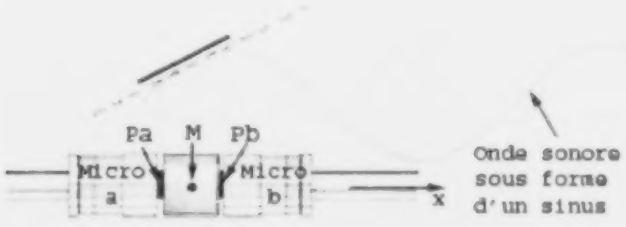


Figure 2 : Schéma des microphones pour l'approximation par différences finies (source : [6])

En intégrant les approximations par différences finies aux notions de traitement du signal, on peut mesurer l'estimation de la partie propagatrice $I_x(M,f)$ de l'intensité acoustique complexe $C_x(M,f)$ avec deux microphones de pression et un analyseur FFT à l'aide de l'équation (4.2).

$$\tilde{I}_x(M,f) = \frac{-\mathrm{Im}\left[\tilde{G}_{ba}(f)\right]}{\omega\rho\Delta x} \tag{4.2}$$

Les paramètres reliés à cette équation sont:

G_{ba} : l'interspectre[2] entre le signal des microphones a et b [Vrms]

ω : vitesse angulaire [rad/s]

ρ : masse volumique du fluide (ρ_{air} = 1.209 kg / m^3 à 20° et à la pression de 101.7 kPa)

Δx : Distance entre les microphones

5. DÉVELOPPEMENT MATÉRIEL

5.1 Choix du DSP

Pour le projet actuel, la carte de développement SR (Signal Ranger) de la compagnie Soft dB inc. a été sélectionnée pour l'acquisition et le traitement du signal. La carte utilise le processeur TMS320VC5402 de Texas Instrument. Les principales spécifications techniques de la carte sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1 : Spécifications techniques de la carte DSP SR

Description	Spécification
Fréquence d'échantillonnage par canal avec le filtre anti-repliement	21 700 Hz
Résolution des ADC (analog to digital converter)	16 bits
Nombre de canaux	8 entrées / 8 sorties
Gamme dynamique d'entrée	+/- 10 volts
Gamme dynamique sortie	+/- 2,5 volts
Nombre d'opération par seconde du processeur	100 Mbs
Communication	lien USB

[2] Interspectre : L'interspectre est la transformée de Fourier de la fonction d'intercorrélation entre deux signaux temporels.

La carte permet de couvrir une bande audio de 0 à 8 476 Hz. En intensimétrie, cette bande est suffisante car la mesure en plus haute fréquence exige un espacement intermicrophonique très petit. La technologie utilisée permet une programmation pour l'acquisition et le traitement du signal sur la carte. De plus, la communication rapide entre l'ordinateur et le PC par le lien USB permet d'effectuer le traitement du signal plus complexe directement sur l'ordinateur.

5.2 Choix des micros

TECHNOLOGIE DES MICROPHONES À ÉLECTRET

Les microphones à électret travaillent selon un principe quasi identique à celui du microphone à condensateur et ils existent depuis de nombreuses années. La différence principale est que la charge électrique sur le diaphragme n'est pas fournie par une alimentation, mais appliquée de manière permanente au moment de la fabrication (voir Figure 3).

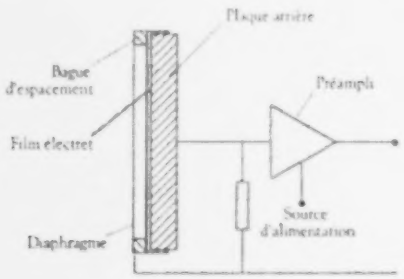


Figure 3 : Schéma de montage d'un microphone électrostatique à électret (source : [17])

MICROS SENNHEISER KE4-211-2

Les microphones électrostatiques à "back-electret" KE4–211-2 développés par la compagnie Sennheiser ont été utilisés pour le développement de l'intensimètre. Les microphones possèdent une réponse en fréquence uniforme de 20 à 20 000 Hz (voir Figure 4).

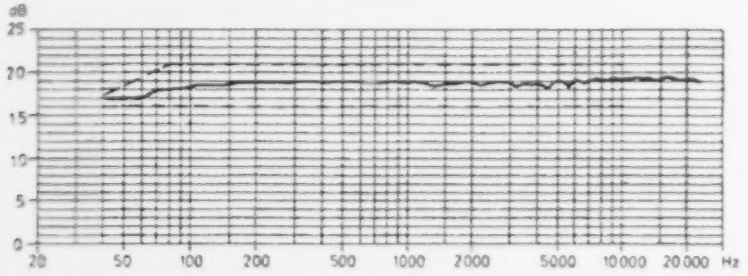


Figure 4 : Réponse en fréquence des microphones KE4–211-2

Le Tableau 2 affiche les principales caractéristiques des microphones KE4–211-2 fournies par le fabricant (la fiche technique détaillée des microphones est disponible à partir du site www.sennheiser.com).

Tableau 2 : Spécifications techniques des microphones à électret

Description	Spécifications
Ratio signal/bruit	~ 58 dB
Sensible aux variations de l'environnement (vent, densité de l'air, température)	oui
Directivité	omnidirectionnels
Caractéristiques physiques	robustes et durables

La principale différence entre les microphones choisis et ceux utilisés avec les sondes d'intensité commerciales courantes est l'écart plus grand dans la réponse en phase entre la paire de microphones. Habituellement, la paire de microphones dédiée à l'intensimétrie, dite appareillée en phase[3], possèdent peu ou pas d'écart de réponse en phase (voir site www.bksv.com pour des fiches techniques de microphones appareillés en phase). Le problème est que cette différence de réponse en phase occasionne une erreur dans la mesure d'intensité. C'est pourquoi cette différence de phase entre les microphones KE4–211-2 devra être identifiée et corrigée avant le calcul d'intensité.

5.3 Préamplificateurs

Les préamplificateurs utilisés ont été conçus spécialement pour l'amplification du signal des microphones KE4–211-2 par la compagnie Soft dB inc. Ces préamplificateurs permettent d'ajuster le gain en trois positions en fonction du niveau sonore mesuré. Le ratio signal sur bruit obtenu avec les 3 gains est d'environ 70 dB.

En utilisant la gestion programmable du gain des convertisseurs analogique/digital de la carte SR, on peut donner plus de flexibilité aux niveaux de bruit mesurés avec les préamplificateurs. Sachant que la carte SR ne peut supporter une tension plus grande que 10 volts à l'entrée, le Tableau 3 relate les niveaux de bruits mesurables en utilisant la chaîne microphonique incluant: microphone KE4–211-2, préamplificateur, carte SR.

[3] Un fabricant garantit, entre deux microphones appareillés, une tolérance maximale variant de ±0,05° de différence de phase entre 0 et 250 Hz.

Tableau 3 : Gamme de bruit mesurable avec la chaîne microphonique

Gain du préamplificateur	Gamme de bruit couverte
x0	52 à 117 dB
x10	37 à 90 dB
x100	27 à 82 dB

5.4 Usinage des prototypes de sonde d'intensité

Deux prototypes de sonde d'intensité ont été fabriqués afin de subir des tests de validation. Les principales différences entre ces deux sondes résident dans l'orientation des micros par rapport au front d'onde de pression.

PREMIER PROTOTYPE (P1)

Tel qu'on peut le voir sur la Figure 5, les microphones de ce prototype sont parallèles et orientés perpendiculairement au front d'onde de pression sonore mesurée. La distance entre les microphones est réglable.

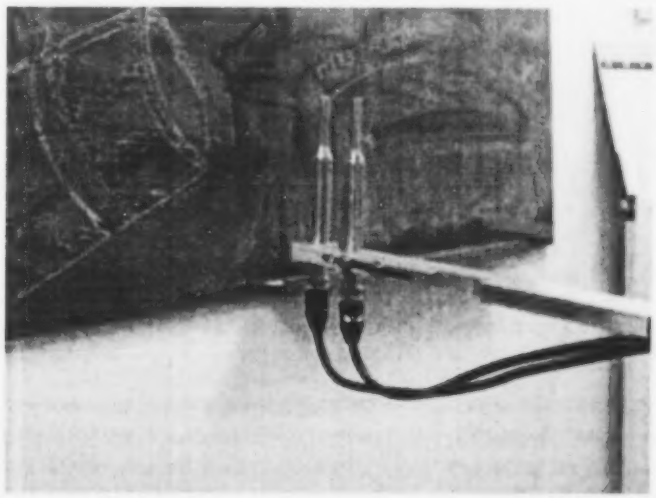


Figure 5 : Prototype de sonde d'intensité avec micros en parallèle et espacement réglable

Le Tableau 4 répertorie les principaux avantages et inconvénients du premier prototype de sonde à microphones parallèles.

Tableau 4 : Caractéristiques du prototype 1

	Description
Avantages	- La conception mécanique est simple et peu coûteuse - La distance entre les microphones est réglable à l'aide d'une glissière - Les microphones en parallèle bénéficient d'une même orientation par rapport au front d'onde (en supposant une directivité équivalente pour les deux capsules microphoniques à électret)
Inconvénients	- L'influence de la diffraction, liée aux propriétés géométriques de la sonde, sur les mesures d'intensité - Exige une omnidirectivité uniforme pour chacun des microphones - Effets de réflexion sur la sonde

DEUXIÈME PROTOTYPE (P2)

Le deuxième prototype (voir Figure 6) est un modèle similaire aux sondes d'intensité commerciales (voir Figure 7) en vente sur le marché mondial. Des adaptateurs ont été usinés pour permettre la calibration en amplitude des microphones avec embouts dans les calibreurs normalisés. On peut apercevoir trois boutons de contrôle sur la poignée de la sonde qui servent à communiquer des instructions de mesure au DSP. Une LED (diode électroluminescente) deux couleurs sur la poignée donne des informations à l'utilisateur sur la procédure d'acquisition. De plus, sur ce prototype, le capteur de position est fixé entre les deux tiges d'acier inoxydable.

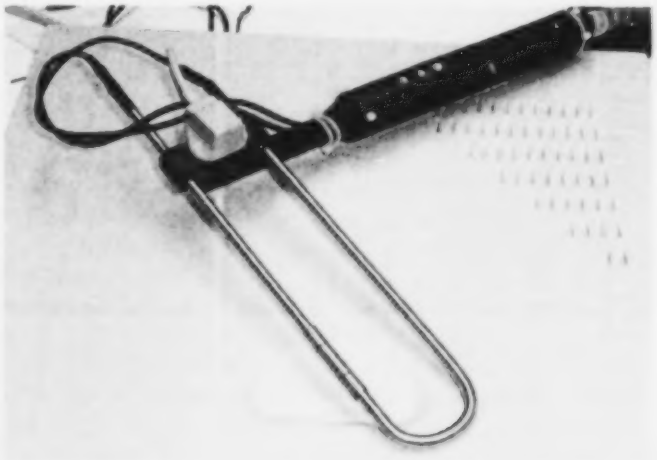


Figure 6 : Prototype de sonde d'intensité P2 avec micros face à face et espacement réglable

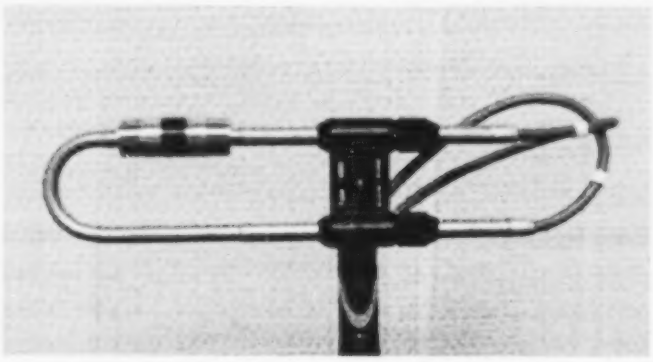


Figure 7 : Sonde d'intensité développée par B&K

Au Tableau 5, on retrouve les principales caractéristiques du prototype de sonde en configuration face à face.

Tableau 5 : Caractéristiques du prototype 2

	Description
Avantages	- Conception mécanique robuste - Distance entre les microphones fixée mécaniquement avec des espaceurs - Mesures d'intensité viables malgré les imperfections
Inconvénients	- Effets de réflexion sur la sonde - Effet de diffraction asymétrique entre les deux microphones

5.5 Sélection du système de repérage

La technique couramment utilisée en industrie pour la mesure d'intensité consiste à balayer une surface virtuelle [15] et de mesurer la moyenne de l'intensité rayonnée à travers cette même surface. Étant donné que l'application développée se veut utilisable en industrie, le système de repérage spatial doit s'adapter à cette technique de mesure. À partir de ce principe, le système de positionnement choisi doit ensuite être portatif pour permettre l'accès aux milieux encombrés caractéristiques de l'industrie. Ensuite, le choix du système sera basé sur le coût associé à un système fonctionnel. Par rapport aux autres techniques de cartographie qui sont confinées aux mesures en laboratoire, on souhaite intégrer une technique de repérage qui rend la mesure possible en industrie.

À partir de recherches sur les systèmes de positionnement actuellement commercialisés sur le marché mondial, nous avons choisi d'utiliser un système déjà développé pour valider la cartographie d'intensité acoustique par méthode de balayage spatial.

La technologie pulsé magnétique a attirée notre attention pour le positionnement. Cette technologie est déjà utilisée en télémédecine, dans les simulateurs de vol de l'armée et en animation graphique.

Le système de positionnement retenu est nommé FOB (flock of bird) et est fabriqué par la compagnie Ascension Technologie [16] (voir Figure 8). Le système est essentiellement composé d'une base d'émission, d'un récepteur et d'un boîtier contenant l'électronique nécessaire à l'acquisition et au traitement du signal lié au positionnement.

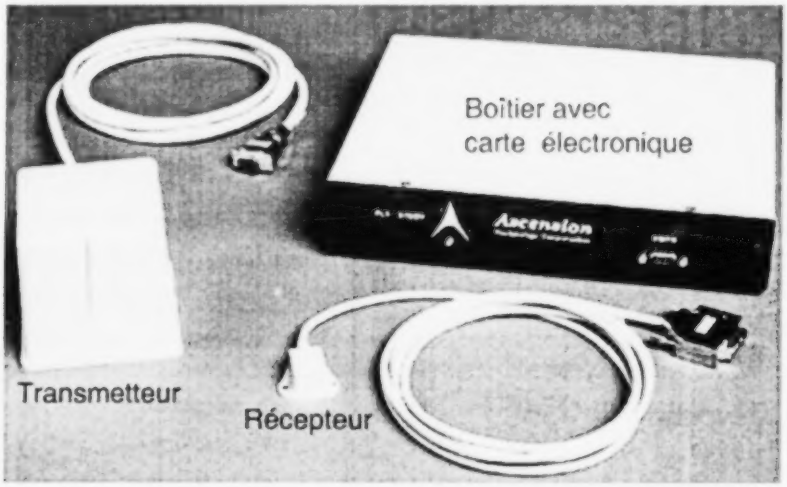


Figure 8 : Système de positionnement (source : [16])

Le système utilise une génération d'ondes pulsées magnétiques. Le Tableau 6 relate les principaux avantages et inconvénients du système. Une fois le receveur du FOB placé sur la sonde, le système de repérage permet de transférer les coordonnées spatiales de la sonde à chaque bloc d'acquisition d'une mesure acoustique. Le logiciel se charge ensuite de coordonner les deux types de données afin d'afficher la carte de bruit.

Tableau 6 : Avantages et limites du système

	Description
Avantages	- Repérage à 1,8 mm près selon 6 DOF (degrés de liberté) - Taux de rafraîchissement des données jusqu'à 144 Hz - Prix du système de base à 4 000 $ CAN - Flexibilité du transfert de données vers la carte DSP de l'intensimètre - Possibilité de rendre la technologie portative avec une batterie (puissance maximale en entrée de 25 watts)
Limites	- Technologie sensible aux fortes perturbations électromagnétiques (voir annexe B) - Portée de 1.2 m avec transmetteur de base

Le système de positionnement retenu est nommé FOB (flock of bird) et est fabriqué par la compagnie Ascension Technologie [16] (voir Figure 8). Le système est essentiellement composé d'une base d'émission, d'un récepteur et d'un boîtier contenant l'électronique nécessaire à l'acquisition et au traitement du signal lié au positionnement.

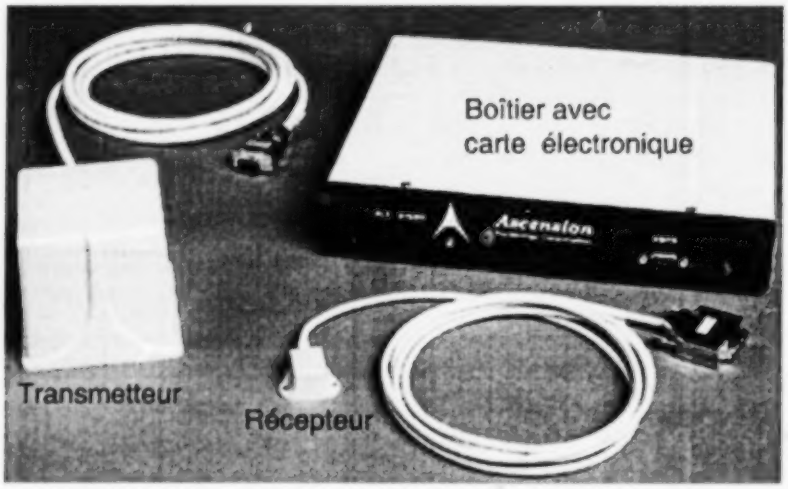


Figure 8 : Système de positionnement (source : [16])

Le système utilise une génération d'ondes pulsées magnétiques. Le Tableau 6 relate les principaux avantages et inconvénients du système. Une fois le receveur du FOB placé sur la sonde, le système de repérage permet de transférer les coordonnées spatiales de la sonde à chaque bloc d'acquisition d'une mesure acoustique. Le logiciel se charge ensuite de coordonner les deux types de données afin d'afficher la carte de bruit.

Tableau 6 : Avantages et limites du système

	Description
Avantages	- Repérage à 1,8 mm près selon 6 DOF (degrés de liberté) - Taux de rafraîchissement des données jusqu'à 144 Hz - Prix du système de base à 4 000 $ CAN - Flexibilité du transfert de données vers la carte DSP de l'intensimètre - Possibilité de rendre la technologie portative avec une batterie (puissance maximale en entrée de 25 watts)
Limites	- Technologie sensible aux fortes perturbations électromagnétiques (voir annexe B) - Portée de 1,2 m avec transmetteur de base

6. IMPLANTATION DE L'ANALYSEUR SUR SUPPORT DSP

IMPLANTATION DE L'INTENSIMÈTRE

Le travail avec la carte DSP SR exige du développement au niveau logiciel (avec le logiciel Labview) pour établir la communication entre les différentes entrées, gérer la gamme dynamique des convertisseurs, établir les paramètres d'acquisition et de traitement du signal. Heureusement, plusieurs pilotes déjà développés pour la carte SR servent à la gestion de ces paramètres d'acquisition sur la carte DSP. Le travail de programmation PC réside donc dans l'établissement de la communication, avec l'aide des pilotes, entre le logiciel principal et la carte DSP.

Tout le traitement des FFT (Fast Fourier Transform) est effectué à haut niveau sur le PC. La raison principale de ce choix est reliée à la complexité de la programmation de l'interspectre sur le DSP en point fixe. De plus, en sachant que les sources mesurées en intensimétrie sont stationnaires, il n'est pas essentiel d'effectuer les mesures en temps réel sur le DSP. Cette flexibilité nous permet donc de travailler sur le PC.

Tous les paramètres d'acquisition étant gérés par le programme principal, les blocs d'acquisition du signal temporel sont transférés du DSP et traités par le PC. Le programme principal effectue les moyennes linéaires ou exponentielles, les pondérations, les corrections à partir des données fréquentielles et ainsi que les autres traitements nécessaires au système de positionnement.

La surveillance et le contrôle des trois boutons de la sonde ainsi que de l'état de la LED sont effectués par un programme sur la carte DSP. Lorsqu'un événement intervient au niveau des boutons, les informations sont alors communiquées du DSP vers le programme sur le PC.

IMPLANTATION DU SYSTÈME DE POSITIONNEMENT AU LOGICIEL D'INTENSIMÉTRIE

La compagnie du système de positionnement fournit des pilotes de communication en langage C. Ces pilotes ont été adaptés au logiciel Labview pour la programmation PC. L'établissement de cette communication permet le réglage des paramètres d'acquisition et l'acquisition des informations de positionnement pertinentes à l'application par le programme principal d'intensité. Les informations de positionnement utilisées sont les coordonnées en X, Y et Z, les angles de rotation angX, angY et angZ, ainsi que la matrice de transfert qui permet de travailler dans un plan de repère différent.

Ensuite, la synchronisation des mesures de positionnement et d'acoustique est effectuée directement dans le logiciel principal d'intensimétrie.

7. DÉVELOPPEMENT DE L'INTERFACE CONVIVIALE

7.1 Programme principal d'intensimétrie

INTERFACE

L'interface graphique a été développée avec le logiciel Labview en fonction d'une utilisation simple de l'équipement de mesure (voir Figure 9). Les spectres, supérieur et inférieur, représentent respectivement la pression moyenne efficace des micros A et B ainsi que le spectre d'intensité en fonction de la

fréquence. Le spectre d'intensité est composé de deux couleurs distinctes pour modéliser l'énergie rayonnée positive (rouge) et négative (bleu). Il est possible d'afficher les résultats en octave, 1/3 octave, 1/12 octave et en bandes fines.

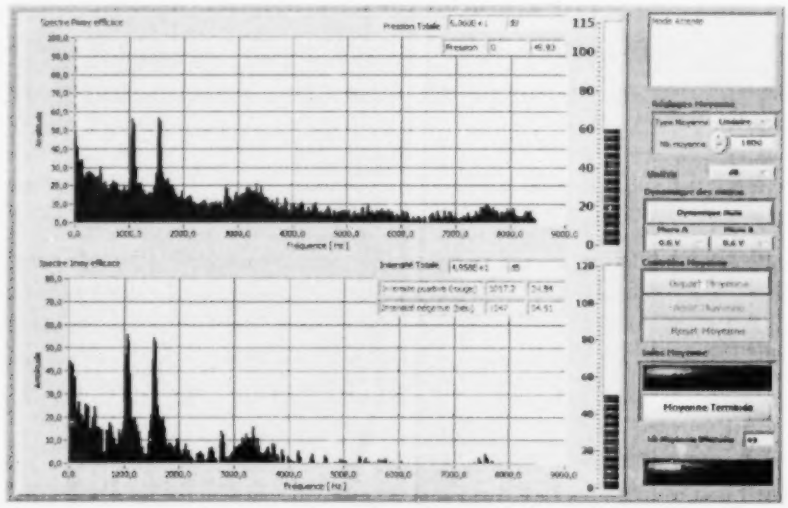


Figure 9 : Interface graphique principale de l'intensimètre

Les niveaux de pression totale et d'intensité totale sont représentés numériquement au-dessus de chacun des graphiques et sous forme de bandes de couleur à droite des graphiques.

FONCTIONNEMENT

Le nombre de boutons de réglage est limité à l'essentiel. Les boutons « Réglages moyenne » permettent de choisir le type de moyenne (linéaire ou exponentielle) ainsi que le nombre de moyenne.

Un bouton sert à la sélection des unités (linéaire, dB et dB(A)) à afficher dans les graphiques.

Les principaux boutons de contrôle sont les boutons « Départ Moyenne », « Arrêt Moyenne » et « Reset Moyenne ».

Les boutons « Dynamique des micros » permettent d'ajuster la gamme dynamique des entrées (les microphones) automatiquement ou manuellement.

Dans les informations sur la moyenne, le nombre de moyenne effectué est affiché ainsi que des voyants pour les saturations et la fin de la moyenne. Le voyant « Saturation » reste alors allumé si un signal trop fort parvient aux entrées pendant les mesures. Lorsque la moyenne est complétée, le logiciel indique la fin de la moyenne avec le voyant « Moyenne Terminée ».

Les boutons « Dynamique des micros », « Reset Moyenne » et « Départ Moyenne » peuvent être actionnés à partir de la sonde d'intensité.

7.2 Module de cartographie acoustique

INTERFACE

L'interface du module de calibration est présentée à la Figure 10. Le spectre de pression est remplacé par une carte de bruit, un curseur de sélection de la fréquence affichée et un bouton indicateur de position de la sonde dans le plan balayé. Notez qu'à titre de démonstration, la photo de la surface balayée a été superposée à l'interface.

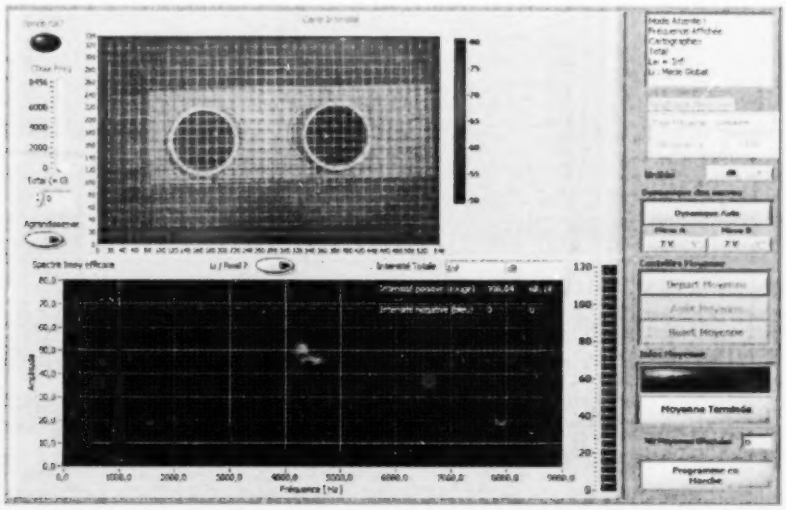


Figure 10 : Module de cartographie

FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement du module est similaire à celui utilisé pour l'intensimètre de base à l'exception que, lors du démarrage de la mesure, l'utilisateur est dirigé par l'interface lors de la définition de la surface 2D avec la sonde d'intensité.

Le système FOB est configuré, au niveau logiciel, de manière à fournir la matrice de rotation et les positions en XYZ du récepteur. À chaque mesure, une correction pour le décalage des microphones par rapport au récepteur est effectuée par le logiciel. Théoriquement, le système FOB est configuré pour envoyer jusqu'à 144 positions par seconde. Pratiquement, la vitesse du logiciel sur le PC limite la vitesse de lecture des positions. Dans un développement optimal, cet aspect pourrait être amélioré en communiquant directement avec le DSP. L'approche de communication avec le PC a été privilégiée pour sa simplicité et cela nous permet de travailler avec la sonde.

L'équipement d'intensité développé travaille sur une logique où un plan est défini avec la sonde par l'utilisateur en début de mesure. Toutes les mesures qui seront effectuées à l'intérieur de ce plan serviront au calcul de l'intensité et de la puissance acoustique de la source. Les mesures à l'extérieur du plan seront tout simplement rejetées par l'interface. La méthodologie de définition du plan consiste en :

1) L'acquisition du premier point qui sera défini comme le coin inférieur gauche du plan. À partir de ce même point et de l'orientation de la sonde, la matrice de transfert du plan de référence est établie et servira au calcul de la position relative dans le plan pour le logiciel;

2) L'acquisition du deuxième point qui sert à définir fermer la limite du plan, c'est-à-dire le coin supérieur droit. Le logiciel vérifie si le point entre dans les limites.

Lors de l'acquisition de l'intensité, un voyant sur l'interface et la LED sur la poignée s'allume pour signifier à l'utilisateur qu'il place la sonde correctement dans le plan pour effectuer la mesure. La tolérance pour la gestion de l'erreur raisonnable de position est effectuée à même le logiciel principal.

De plus, une fois la mesure terminée, le niveau de puissance de la surface balayée est calculé en post-traitement et affiché automatiquement. L'utilisateur peut aussi choisir la fréquence à laquelle la cartographie peut être affichée ou sinon afficher le niveau d'énergie totale rayonnée, positivement et négativement, à travers la surface.

7.3 Sous-programme de calibration en amplitude des microphones

INTERFACE

Les deux graphiques affichés de la Figure 11 représentent le spectre de pression mesuré (graphique supérieur) et le signal temporel mesuré (graphique inférieur) aux entrées des micros A et B. Les couleurs bleue et rouge permettent de distinguer les micros A et B. Les bandes de couleur bleue et rouge à droite du spectre de pression affichent le niveau de pression mesuré à la fréquence de calibration pour les micros A et B.

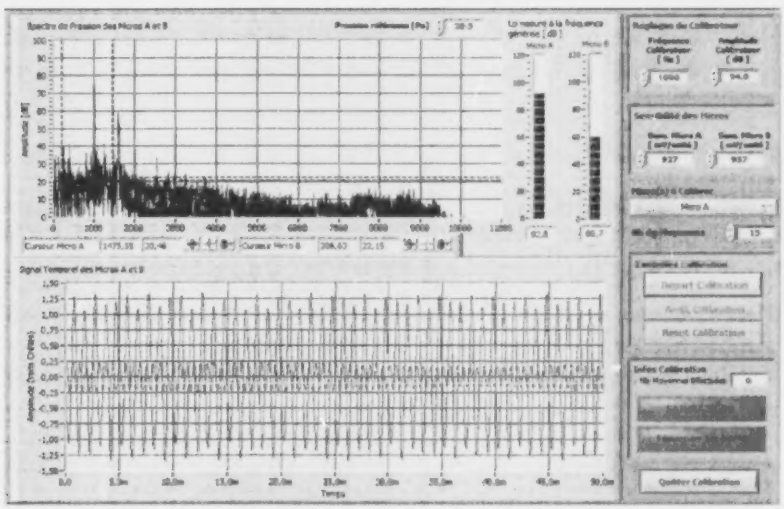


Figure 11 : Interface graphique du sous-programme *Calibration en Amplitude des micros*

FONCTIONNEMENT

La première partie des réglages concerne les paramètres de fréquence et d'amplitude du calibreur (source étalon).

La sensibilité des micros A et B peut être entrée manuellement ou calculée automatiquement avec l'usage du bouton « Départ Calibration ». Lorsque le bouton « Départ calibration » est activé, une pression moyenne est calculée au microphone sélectionné à l'aide du bouton « Micro(s) à calibrer ».

Le bouton « Quitter Calibration » permet de retourner au programme principal. Avant de retourner au programme principal, une boîte de dialogue demande à l'utilisateur s'il veut conserver ou rejeter les nouveaux paramètres de sensibilité des micros.

7.4 Sous-programme calibration en amplitude et en phase automatisée

INTERFACE

L'interface du sous-programme de calibration en amplitude et en phase des chaînes microphoniques est présentée à la Figure 12. L'utilisateur peut voir l'amplitude et la phase de la fonction de transfert mesurée, la cohérence, la pression aux deux microphones, les signaux temporels ainsi que l'amplitude et la phase de la correction.

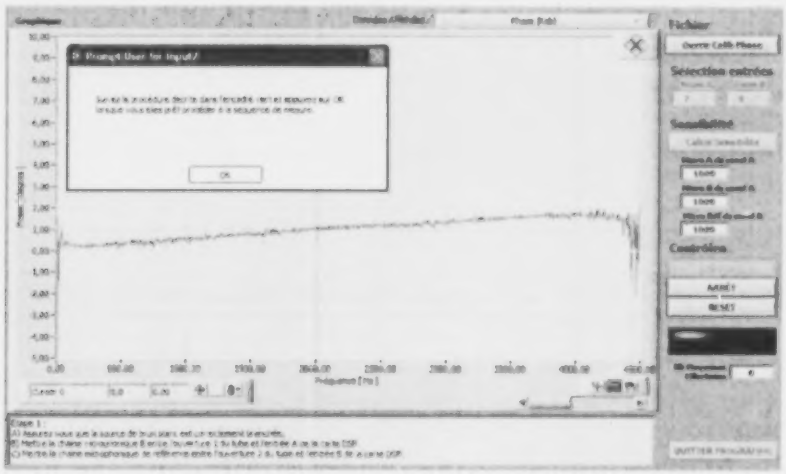


Figure 12 : Sous-programme de correction en amplitude et en phase

FONCTIONNEMENT

L'interface de calibration en amplitude et en phase est développée de manière à indiquer la procédure de correction à l'utilisateur. Ces consignes sont reliées au montage tel que décrit plus loin à la section 8.1. Le sous-programme est fait de manière à calculer automatiquement la correction une fois la procédure terminée. De plus, la correction est enregistrée et rafraîchie automatiquement dans le logiciel d'intensimétrie. Cette correction s'adapte aussi à la taille des blocs d'échantillons choisis par l'utilisateur.

Avant de débuter le calcul de correction, l'utilisateur est invité à calculer la sensibilité des microphones utilisés pour la procédure de mesure.

8. RÉSULTATS

8.1 Correction de phase automatisée

Une erreur de phase induit de fortes erreurs sur la mesure d'intensité en basse fréquence. L'utilisation d'un système à faible coût implique, dans notre cas, l'utilisation de microphones non appareillés en phase. Une correction des réponses en phase est donc essentielle à la prise de mesures valables avec l'intensimètre.

De plus, les basses fréquences sont plus susceptibles d'êtres influencées en raison de la faible différence de phase pour de grandes longueurs d'ondes. En effet, lorsque la partie imaginaire de l'interspectre G_{ba} mesuré devient très faible, elle se confond dans le bruit électronique des convertisseurs.

Sur le marché, il existe des calibrateurs commerciaux compacts qui permettent une calibration en phase des équipements d'intensimétrie. Ces calibrateurs sont très onéreux (environ 12 000 $CAN). Pour cette raison, des solutions plus économiques ont été préférées.

OBJECTIF GÉNÉRAL

L'objectif général est d'obtenir l'intensimètre idéal en corrigeant le déphasage instrumental. Par contre, en sachant que les corrections apportées ne conduisent pas à la perfection, il importe de choisir la tolérance acceptable pour la différence de phase entre les micros. Ce choix influencera directement la précision des mesures d'intensité en fonction de la fréquence.

CORRECTION DES MESURES AVEC L'INTENSIMÈTRE IDÉAL

Le calcul de la correction K_{ab} est basé sur la comparaison de deux systèmes composés d'un intensimètre réel et d'un intensimètre étalon fictif idéal (voir Figure 13).

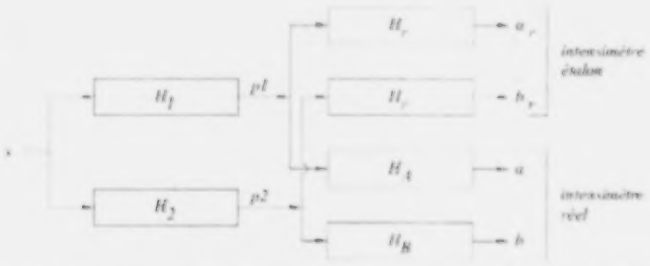


Figure 13 : Configuration de mesure entre l'intensimètre étalon et réel

où :

H_1 : Fonction de transfert du système et de l'environnement entre le signal source s et le point de pression $p1$

H_2 : Fonction de transfert du système et de l'environnement entre le signal source *s* et le point de pression *p2*

H_r : Fonction de transfert de la chaîne microphonique de référence

H_A : Fonction de transfert de la chaîne microphonique *A* (à calibrer)

H_B : Fonction de transfert de la chaîne microphonique *B* (à calibrer)

ar, br : Sorties du système qui représentent les pressions acoustiques mesurées sur les canaux *ar* et *br* de l'intensimètre étalon

a, b : Sorties du système qui représentent les pressions acoustiques mesurées sur les canaux *a* et *b* de l'intensimètre réel

On en déduit alors l'expression de la correction K_{ab} qui permet d'obtenir une mesure d'intensité corrigée par rapport à l'intensimètre idéal :

$$K_{ab} = \left| \frac{H_r}{H_A} \right|^2 \cdot \frac{H_A}{H_B} \qquad (8.1)$$

À partir de l'équation (8.1), tout l'intérêt réside maintenant à déterminer expérimentalement la valeur de K_{ab} pour estimer l'interspectre idéal théorique.

MÉTHODE DE SUBSTITUTION-PERMUTATION

La méthode expérimentale choisie est basée sur l'évaluation des fonctions de transfert du système par une méthode de substitution et de permutation des deux microphones à calibrer et d'un microphone de référence. Le but est d'ajuster les propriétés des deux microphones pour qu'elles soient identiques à celles du microphone de référence. Un des points importants de cette méthode est basé sur le contrôle des positions des microphones lors des différentes séquences de mesures. Deux montages ont été choisis et testés pour l'environnement d'identification des différentes fonctions de transfert, soit le coupleur haute pression de la compagnie B&K (voir Figure 14) et le tube à terminaison anéchoïque (voir Figure 15).

Figure 14 : Coupleur B&K

Figure 15 : Tube à terminaison anéchoïque

MONTAGE

Le microphone de référence utilisé est un microphone à électret KE-411 (avec un préamplificateur indépendant de celui des micros a et b).

COUPLEUR B&K

- La paire de microphones est insérée, à l'aide d'un adaptateur, dans le coupleur B&K;
- À l'entrée du coupleur, on connecte une source de bruit blanc généré par une carte DSP Signal Ranger;
- Les microphones sont maintenus enfoncés à l'aide du système de ressort du coupleur B&K;

- Le coupleur est installé sur un cylindre d'acier de 10 kg;
- Le montage est réalisé dans la chambre anéchoïque du LEA.

TUBE À TERMINAISON ANÉCHOÏQUE

- Les microphones sont insérés dans des ouvertures dans le tube à l'aide d'adapteurs pour permettre un bon alignement et un contrôle de la position en affleurement de la paroi intérieure du tube;
- Sur le haut-parleur situé à l'une des extrémités du tube, on connecte une source de bruit blanc généré par une carte DSP Signal Ranger;
- Le montage est réalisé dans la chambre anéchoïque du LEA.

RÉSULTATS

La méthode de substitution-permutation permet d'identifier la correction des microphones utilisés par rapport à un microphone de référence. Le point important de cette méthode de substitution-permutation, ce n'est pas d'avoir un microphone de référence idéal, mais d'avoir deux microphones de mesures qui ont une réponse en amplitude et une réponse en phase identiques. Pour obtenir une correction fiable, il est important de ne point modifier l'environnement des microphones lors du processus de mesure.

Pour éviter les erreurs aléatoires, la cohérence γ^2_{ba}, entre les deux chaînes microphoniques, devient un critère de validité de la mesure dans la méthode de substitution-permutation. Pour la méthode avec le coupleur, la cohérence est >0.999 de 65 Hz à 6 200 Hz. Avec le tube à terminaison anéchoïque, la cohérence est >0.999 de 70 Hz à 4 350 Hz (voir Figure 16).

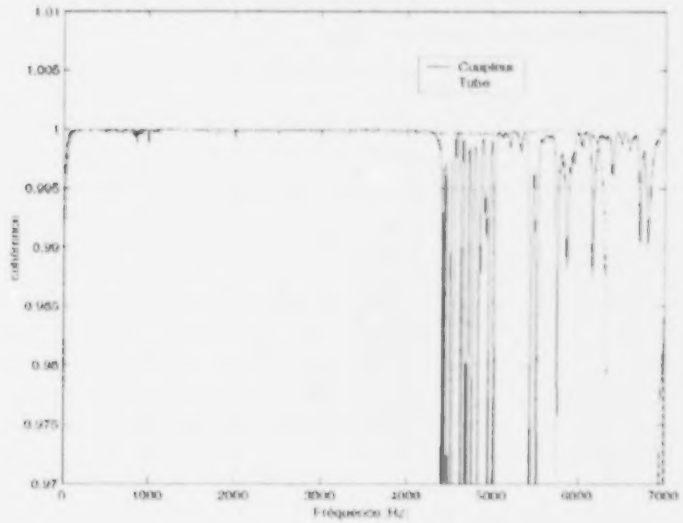


Figure 16 : Cohérence typique des mesures des fonctions de transfert

La Figure 17 présente la correction de phase obtenue avec les deux méthodes d'évaluation du déphasage instrumental. La méthode du tube à terminaison anéchoïque donne une courbe de correction lisse et sur une bande de fréquence allant jusqu'à 4 300 Hz. Cette fréquence seuil est liée à la fréquence de coupure du tube qui est directement reliée au diamètre du tube où l'hypothèse d'ondes planes ne tient plus. La courbe obtenue avec le coupleur B&K est lisse jusqu'à 1 500 Hz. Les deux courbes de correction K_{ab}, obtenues avec deux méthodes différentes, se chevauchent de 130 Hz à 1 500 Hz. Il est à noter que les résultats de corrections de phase K_{ab} ont été reproductibles à environ ± 0,1°, sur la bande de fréquence de 100 Hz à 1 000 Hz pour chaque méthode. Avec le coupleur, on observe une fluctuation de K_{ab} vers 300 Hz qui, de prime abord, semble liée à un problème d'étanchéité de la cavité.

Il est important de souligner que les mesures présentées ont été effectuées à un mois d'intervalle. La faible différence mesurée entre les résultats des deux méthodes permet de supposer une bonne stabilité des propriétés de la calibration en fonction du temps.

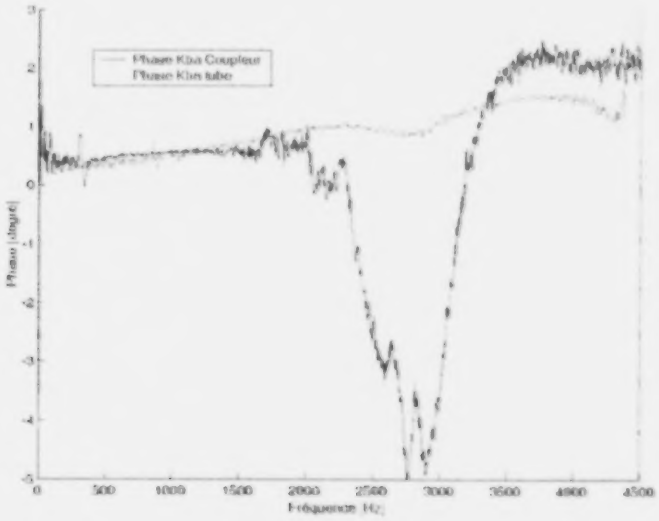


Figure 17 : Phase de la correction K_{ab} (avec micros de référence à électret)

Tel que mentionné précédemment, les basses fréquences sont les plus susceptibles d'être influencées par l'introduction d'un déphasage instrumental. Indépendamment de la méthode, on remarque sur la Figure 17 que le déphasage reste relativement faible (jusqu'à 0,5 degrés) de 100 Hz à 1 000 Hz, pour une paire de microphones non appareillés. Malgré ce faible déphasage, on a constaté que l'impact sur les mesures d'intensité était considérable à ces fréquences.

La courbe de correction de l'amplitude K_{ab} est présentée à la Figure 18. Les deux méthodes d'étalonnage sont équivalentes et donnent des courbes qui se confondent de 100 Hz à 4 400 Hz. C'est en basse fréquence que l'on observe une forte correction d'amplitude qui atteint une amplitude de 18 Vrms à 100 Hz. Pour ce qui est de la bande de plus de 1 000 Hz, on retrouve un facteur de correction d'environ 1 qui indique qu'il y a très peu de correction en amplitude de la fonction de transfert entre les deux microphones.

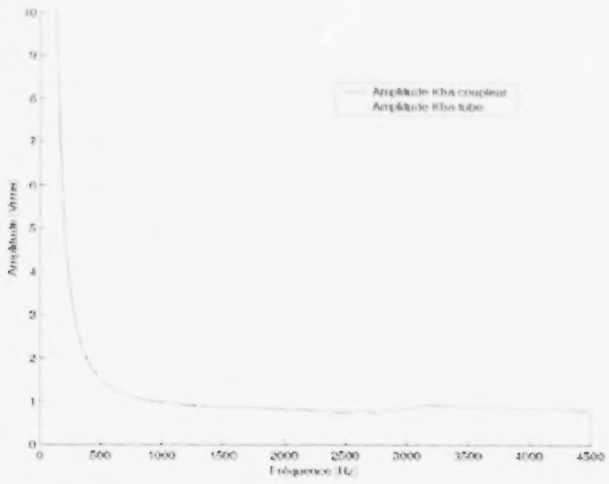


Figure 18 : Amplitude de la correction K_{ab} (avec micros de référence à électret)

Les résultats obtenus avec les deux méthodes d'étalonnage sont exposés au Tableau 7 et au Tableau 8. De par sa simplicité et son efficacité, la méthode privilégiée d'étalonnage est celle qui utilise le tube à terminaison anéchoïque.

Tableau 7 : Résumé des manipulations avec le coupleur B&K

	Coupleur B&K
Avantages	- Calcul de K_{ab}, validé par la méthode du tube à terminaison anéchoïque, en basse fréquence de 130 Hz à 1 500 Hz - Système industriel simple, exigeant seulement un générateur de bruit blanc et des adaptateurs pour les microphones - Bon contrôle de la position des micros
Inconvénients	- Au point de vue pratique, le coupleur exige plus de précautions lors des manipulations (contrôle rigoureux de l'orientation des micros, surveillance du niveau de bruit optimal dans le coupleur, étanchéité importante dans la cavité) - Prix du coupleur - Très sensible au changement de géométrie de la cavité - Requiert un expérimentateur formé pour ce type de manipulation
Améliorations possibles	- Générer un balayage d'un sinus pour le processus de calibration afin d'optimiser la réponse mécanique du piston à l'intérieur du coupleur et ainsi élargir la bande-passante du calcul de K_{ab}

Tableau 8 : Résumés des manipulations avec le tube à terminaison anéchoïque

	Tube à terminaison anéchoïque
Avantages	- Calcul de K_{ab}, validé par la méthode du tube à terminaison anéchoïque en basse fréquence, de 130 Hz à 4 300 Hz - Montage du système à faible coût - Montage simple - Bon contrôle de la position des micros
Inconvénients	- Contrôle rigoureux de l'orientation des micros avec un système de marquage - Montage non industriel, exige du bricolage - Requiert un expérimentateur formé pour ce type de manipulation
Améliorations possibles	- Utiliser un haut-parleur haute-fidélité dans le montage - Réduire le diamètre du tube pour obtenir une fréquence de coupure en plus haute fréquence - Utiliser une transition parfaitement conique entre le haut-parleur et le tube (légère imperfection dans le montage utilisé)

Un des points importants des manipulations est la rigueur expérimentale requise lors des séquences de substitution-permutation. L'expérimentateur a beaucoup d'impact sur la reproductibilité des mesures. Les deux méthodes d'étalonnage exigent donc un expérimentateur formé pour ce type de manipulation.

Les résultats de calibration sont stables sur une période de 1 mois. Par principe de précaution, il est à envisager que cette calibration soit refaite en usine une fois par an pour s'assurer de la validité des résultats.

8.2 Correction de la diffraction

Les microphones, utilisés avec les sondes d'intensité commerciales, sont des microphones à condensateur. Sans entrer dans les détails de la conception de ces microphones, une fine membrane mesure les variations de pression. Cette membrane, très fragile, est recouverte d'une grille de protection. La géométrie de cette grille, possédant des ouvertures sur le devant et sur le côté, permet de mesurer la pression acoustique sur les côtés du microphone, même avec la présence d'un cylindre plein en face du micro (voir Figure 7).

Figure 19 : Deux micros commerciaux (avec grille) utilisés en intensimétrie

Pour le microphone à électret, la prise de pression passe par un orifice situé au centre du micro (voir Figure 20) avant d'atteindre le diaphragme (voir Figure 3).

Figure 20 : Zoom de la prise de pression du micro KE4–211-2

En positionnant simplement les micros en configuration face à face, on observe des effets de diffraction qui influencent la mesure de pression de chaque microphone, de manière asymétrique. Sur la Figure 21, on peut voir la différence entre la mesure de pression sur un des microphones avec et sans la présence de l'autre microphone en face. L'écart de pression mesuré atteint jusqu'à 5 dB.

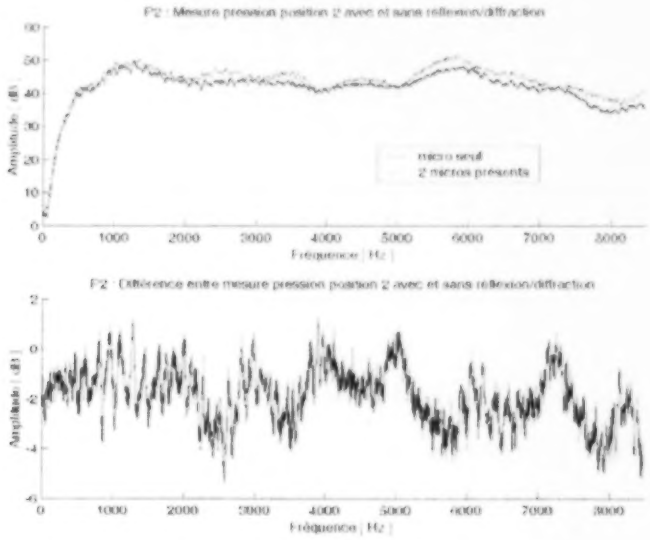


Figure 21 : Mesure de l'effet de diffraction sur le prototype 2

Pour contrôler l'effet de ces diffractions, des embouts ont été usinés de manière à former une petite cavité cylindrique devant chacun des micros avec des prises de son réparties sur la section radiale de la cavité (voir Figure 22). Avec cette configuration, on présume que la pression acoustique qui entre dans chacune des deux cavités est soumise à des effets de diffraction qui sont symétriques pour chacun des microphones. De plus, il faut mentionner que la plus grande dimension des cavités, le diamètre de 4 mm, amène une fréquence de coupure à environ 49 kHz, qui est largement au-dessus de la bande d'audition de l'homme.

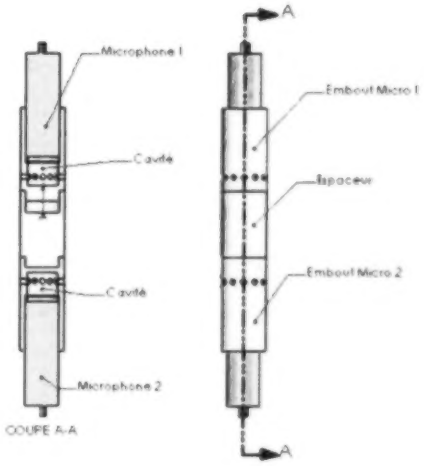


Figure 22 : Système d'embout des microphones

Les embouts ont été validés de manière à vérifier que la fonction de transfert mesuré entre les microphones A et B est symétrique. Pour ce faire, la Figure 23 illustre la différence mesurée entre la fonction de transfert entre les deux microphones avant et après avoir retourné le système d'embout.

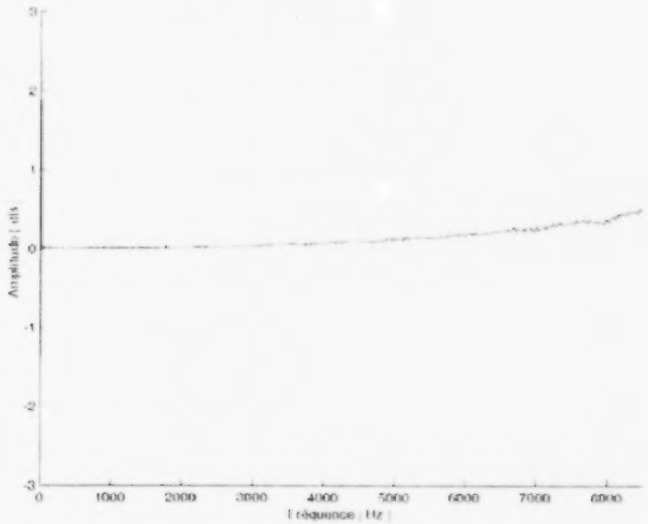


Figure 23 : Différence mesurée entre la fonction de transfert avec l'embout avant et après retournement

La faible erreur mesurée (moins de 0,3 dB de 0 à 8 000 Hz) sur la fonction de transfert entre les deux microphones confirme que l'embout usiné est formé de cavités symétriques devant chacun des microphones et que les ouvertures de chacune des cavités sont équivalentes en terme de dimension. L'utilisation de cet embout, pour la mesure d'intensité, permettra de mieux contrôler les phénomènes de réflexion et de diffraction autour des microphones.

8.3 Validation des mesures avec l'intensimètre

8.3.1 Mesures d'intensité

OBJECTIFS

Les manipulations servent d'abord à évaluer l'impact du déphasage instrumental sur la mesure d'intensité avec les prototypes de sonde 1 et 2. Ensuite, on corrige les mesures avec K_{ab} pour réévaluer la mesure d'intensité corrigée par rapport à une sonde étalon avec des microphones appareillés en phase.

MONTAGE

Les sondes d'intensité sont placées à 2,5 m d'un haut-parleur générant un bruit blanc. Un système de repère spatial sert à repositionner les différentes sondes entre chacune des mesures. Aucun support n'est

déplacé pendant les séries de mesures afin d'éviter de modifier les réflexions acoustiques. Les tests sont effectués dans la chambre anéchoïque du LEA.

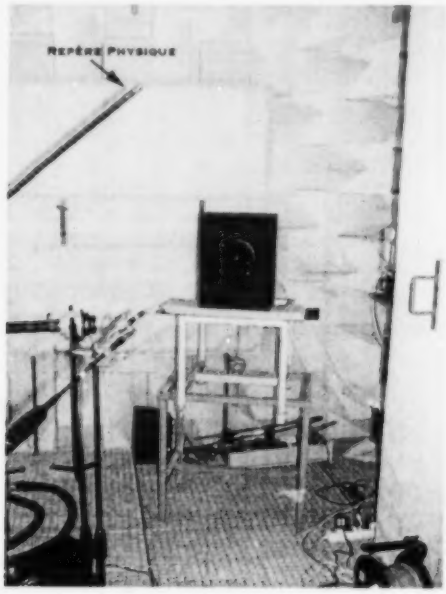


Figure 24 : Montage pour la mesure d'intensité comparative

Les différentes configurations des sondes d'intensité sont présentées au Tableau 9. Le choix des espaceurs des essais n° 1, 2 et 3 correspond à des mesures d'intensité des bandes en hautes, moyennes et basses fréquences. Les bandes passantes affichées sont calculées pour obtenir une erreur théorique de 1 dB avec un déphasage imposé de 0,3° dans le calcul de la limite basse fréquence.

Tableau 9 : Configuration des sondes

	Sonde étalon	**Prototype 1**	**Prototype 2**
Microphones	face à face	parallèles	face à face
Δ x n°1 [mm]	8,5	-	8
Bande-passante n°1 [Hz]	163 Hz – 7 321 Hz	-	172 – 7 787 Hz
Δ x n° 2 [mm]	12	14	20
Bande-passante n°2 [Hz]	115 Hz – 5 186 Hz	98 Hz – 4 450 Hz	69 – 3 112 Hz
Δ x n° 3 [mm]	50	-	58
Bande-passante n°3 [Hz]	28 – 1 245 Hz	-	23 – 1 072 Hz

RÉSULTATS

SÉRIE DE MESURE D'INTENSITÉ AVEC ΔX N° 1

La Figure 25 affiche la mesure d'intensité de la sonde de référence BK et P2 avec et sans correction pour un faible écart des microphones qui permet de mesurer en plus hautes fréquences. Il est évident que la correction basses fréquences (sous 1 000 Hz) appliquée pour la sonde P2 permet une mesure plus fiable par rapport à la sonde de référence. En effet, la sonde P2 sans correction sous-évalue fortement l'intensité sous les 500 Hz. Au-dessus de 4 200 Hz, où la correction cesse d'être appliquée, la mesure d'intensité avec la sonde P2 est surestimée.

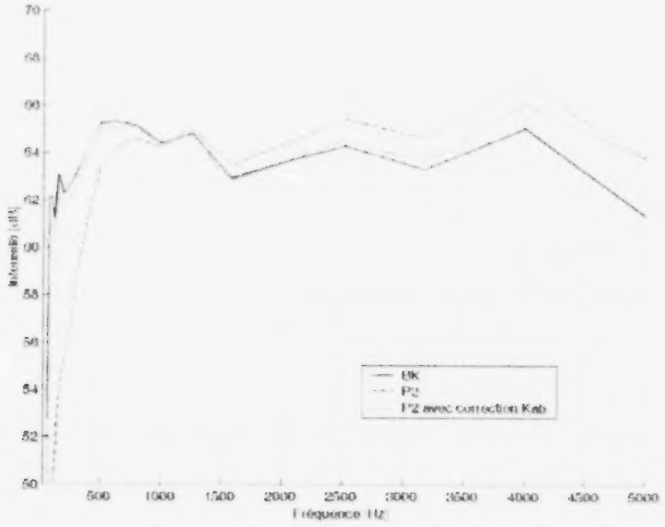


Figure 25 : Intensité moyenne en 1/3 d'octave

On peut observer l'écart avec la mesure d'intensité de référence à la Figure 26. La mesure avec P2 corrigé est valide à 2 dB près sur une bande de fréquences étendue de 92 à 4 200 Hz. De par ces résultats, on suppose que la correction de P2 aurait intérêt à être appliquée au-delà de 4 200 Hz. Dans le cas de la mesure de P2 sans correction, la limite basse fréquence des 2 dB est atteinte dès 500 Hz.

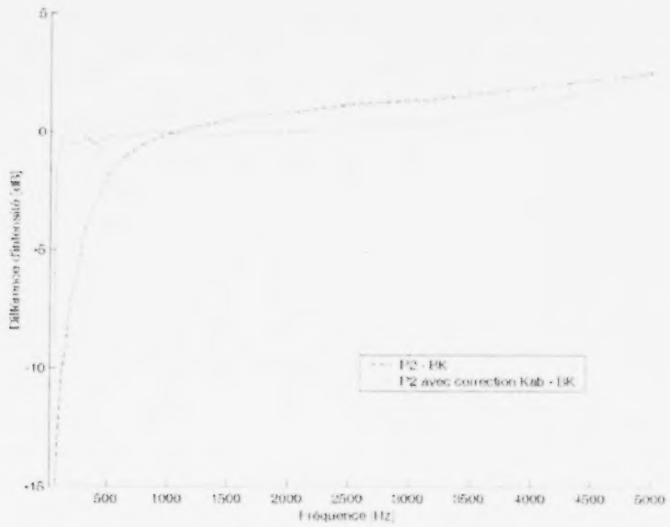


Figure 26 : Différence d'intensité moyenne en 1/3 d'octave

SÉRIE DE MESURE D'INTENSITÉ AVEC ΔX N° 2

La Figure 27 affiche les mesures d'intensité moyennes effectuées en chambre anéchoïque avec sonde de référence (homologuée et calibrée) et les deux sondes prototypes. De plus, les corrections K_{ab} ont été appliquées à l'interspectre G_{ba} de la sonde prototype 2.

On remarque que les mesures d'intensité sous les 300 Hz avec le prototype 1 (P1) sont négatives. En sachant que le prototype 1 est face à un front d'onde direct et sans réflexion du milieu, les mesures d'intensité semblent fortement influencées par des réflexions, des phénomènes de diffraction autour de la sonde ainsi que, vraisemblablement, la directivité des micros. Il est difficile d'évaluer dans quelles proportions ces différents phénomènes viennent influencer la mesure d'intensité avec la sonde P1.

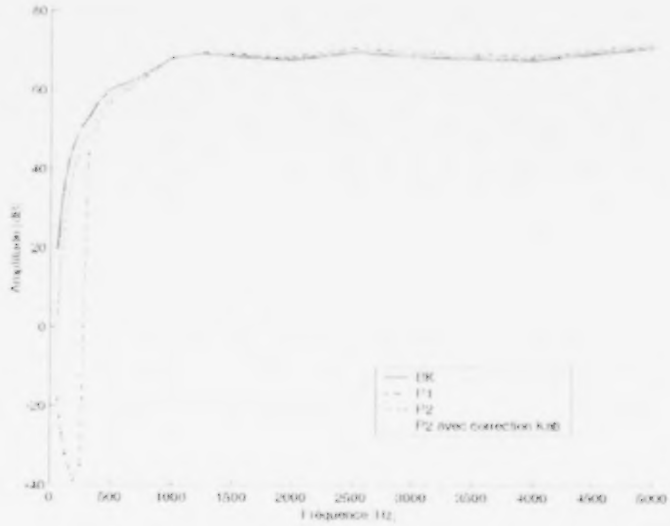


Figure 27 : Intensité moyenne en 1/3 d'octave

La Figure 28 affiche la différence d'intensité moyenne mesurée entre la mesure d'intensité étalon et les mesures d'intensité avec les prototypes (avec et sans correction K_{ab} de l'interspectre G_{ba}). Pour les deux prototypes P1 et P2 sans correction, les différences de mesure d'intensité excèdent 2 dB de référence respectivement vers 600 Hz et 500 Hz. Avec l'ajout de la correction K_{ab} (sans égard à la méthode d'étalonnage), la limite basse fréquence, pour une différence d'intensité de 2 dB, s'étend de 75 Hz à 7 100 Hz. En abaissant la limite de précision à 1 dB, la gamme de fréquences avec la correction pour la sonde P2 est de 150 Hz à 4 450 Hz. Dans cette deuxième configuration d'espaceur, la correction aurait aussi avantage à être appliquée aux fréquences au-dessus de 4 200 Hz. Pour le prototype à micros parallèles P1, la différence d'intensité passe au-dessus de 1 dB en haute fréquence, à partir 2 075 Hz.

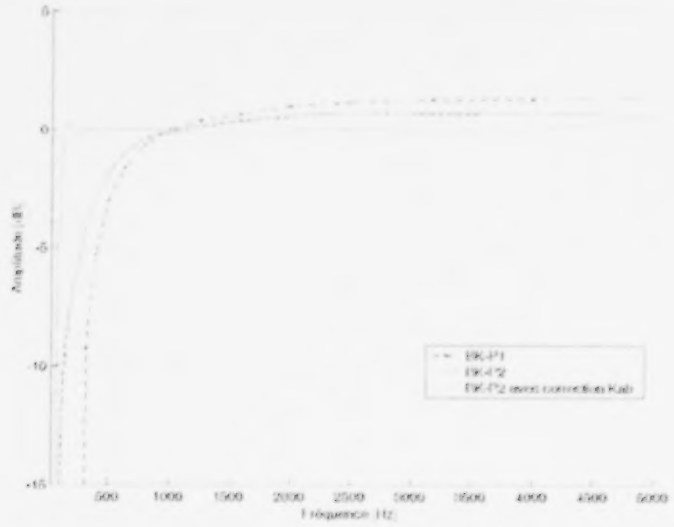


Figure 28 : Différence d'intensité moyenne en 1/3 d'octave

Sans aller investiguer plus loin dans l'évaluation des phénomènes qui amènent les écarts sur les mesures d'intensité avec la sonde P1 et la mesure d'intensité négative en basse fréquence (inversion de la phase de G_{ba}), l'idée de ce prototype à micros parallèles est écartée au profit du prototype P2.

SÉRIE DE MESURE D'INTENSITÉ AVEC ΔX N° 3

L'utilisation d'un plus grand espaceur permet des mesures d'intensité vers les plus basses fréquences. La Figure 29 représente des mesures d'intensité effectuées avec la sonde de référence P2 avec et sans la correction K_{ab}. La mesure de P2 sans correction sous-estime encore une fois l'intensité en basses fréquences de 0 à 750 Hz. En très basses fréquences (sous les 35 Hz), les fortes fluctuations observées sont situées en dessous de la fréquence limite atteinte pour l'écartement de 58 mm de la sonde P2.

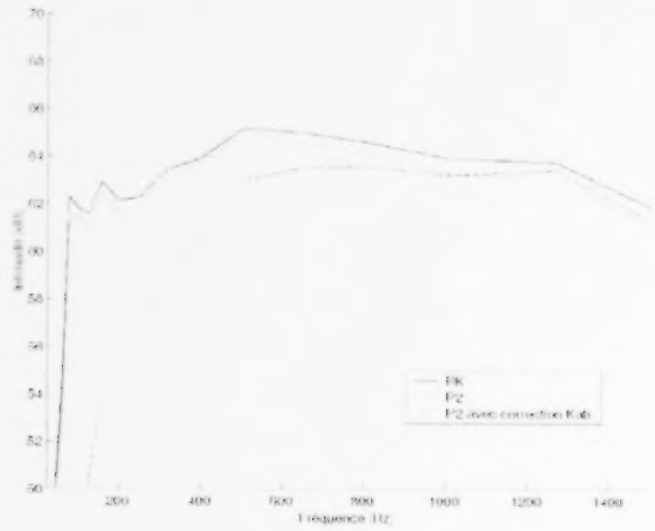


Figure 29 : Intensité moyenne en 1/3 d'octave

La Figure 30 montre la différence entre la mesure d'intensité avec P2 et la sonde de référence. La correction K_{ab} appliquée à la sonde P2 permet d'obtenir une mesure erronée à 2 dB près sur la bande de fréquence située entre 35 Hz et 1 490 Hz.

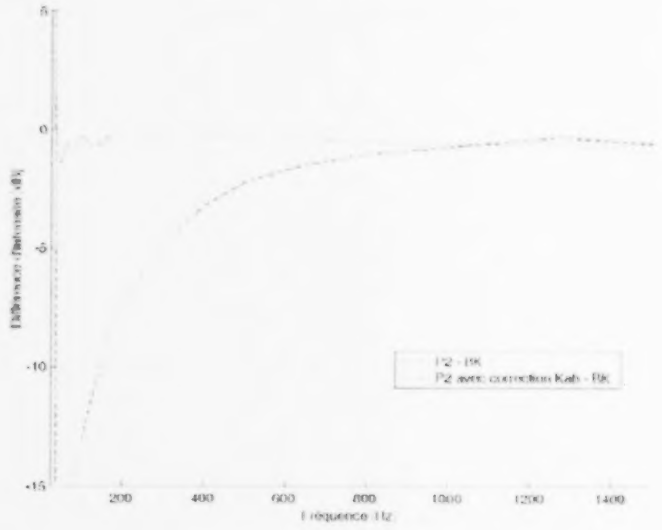


Figure 30 : Différence d'intensité moyenne en 1/3 d'octave

8.3.2 Résumé de la validation

L'étalonnage des microphones à électret est possible avec la méthode de substitution-permutation. Cette méthode exige toutefois un expérimentateur formé pour l'intensimétrie et rigoureux dans les manipulations.

Le tube à terminaison anéchoïque s'avère être le meilleur système pour calculer K_{ab}. Le Tableau 10 présente les principales conclusions des expériences de correction de la mesure d'intensité.

Tableau 10 : Résumé des corrections des mesures d'intensité

	Expérience
Points positifs	- En tolérant une erreur de 2 dB sur la mesure d'intensité, on couvre les bandes de fréquences suivantes avec la sonde P2 : • 92 Hz à 4 200 Hz pour un espaceur de 8 mm • 75 Hz à 7 100 Hz pour un espaceur de 20 mm • 35 Hz et 1 490 Hz pour un espaceur de 58 mm - Les deux méthodes de calibration, coupleur et tube, permettent de corriger les erreurs en basses fréquences, sous les 1 000 Hz - Les mesures sont concluantes avec le prototype 2 à micros face à face avec embouts
Points négatifs ou à améliorer	- La sonde prototype 1 est soumise à des phénomènes de diffraction et de réflexion qui nous forcent à rejeter ce modèle de sonde au profit de la sonde P2 avec configuration à microphones face à face. - La correction est impossible sur le prototype 1, à micros parallèles, en raison des inversions non justifiées de la direction de la propagation du bruit en dessous de 270 Hz. Ce prototype est rejeté au profit de la sonde P2 avec micros face à face. - Une tolérance de 2 dB sur les mesures d'intensité en bandes fines est relativement importante pour des mesures effectuées dans un cadre de recherche scientifique approfondie. Par contre, cette tolérance reste acceptable pour évaluer, de manière comparative, les puissances acoustiques de sources en milieu industriel. - La correction K_{ab} atteint seulement 4 200 Hz avec le tube utilisé de 4 cm de diamètre intérieur. On aurait avantage à élargir la bande de fréquence de correction avec l'utilisation d'un diamètre intérieur de tube de 2 cm, afin d'étendre la correction jusqu'à 8 500 Hz avec l'hypothèse d'onde plane pour une demi-longueur d'onde dans une cavité cylindrique.

8.4 Cartographie

OBJECTIF ET PROBLÉMATIQUE

Évaluer la performance de la cartographie pour l'identification et la localisation des sources de bruit en fonction de la fréquence.

MONTAGE

Le montage (voir Figure 31) est constitué de deux haut-parleurs insérés dans deux tubes. On génère un ton pur de 250 Hz dans un des haut-parleurs et un ton pur de 1 000 Hz dans l'autre. Un grillage est placé sur le dessus des tuyaux pour repérer physiquement le plan balayé avec la sonde. La base de transmission des signaux électromagnétiques est placée dans un rayon de 1,2 m près du plan de cartographie. Le plan défini est de 56 cm x 34 cm.

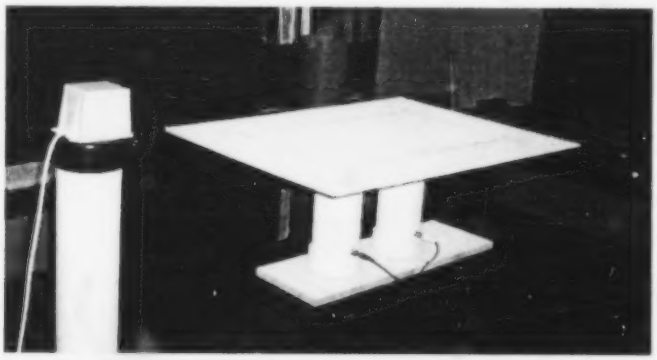


Figure 31 : Montage pour cartographie

Le local des mesures est réverbérant. Le niveau de pression mesuré dans le local est de 39 dB(A).

RÉSULTATS

La Figure 32 illustre une cartographie de l'intensité totale rayonnée dans le plan. Les niveaux d'intensité présentés sont en dB(A) et les valeurs des positions horizontales et verticales sur la carte sont en millimètres.

Tout d'abord, on identifie deux zones de propagation circulaire de l'intensité acoustique. Ces deux zones correspondent fidèlement aux ouvertures de nos deux tubes. Le tube de droite émet un niveau d'intensité plus élevé que le tube de gauche.

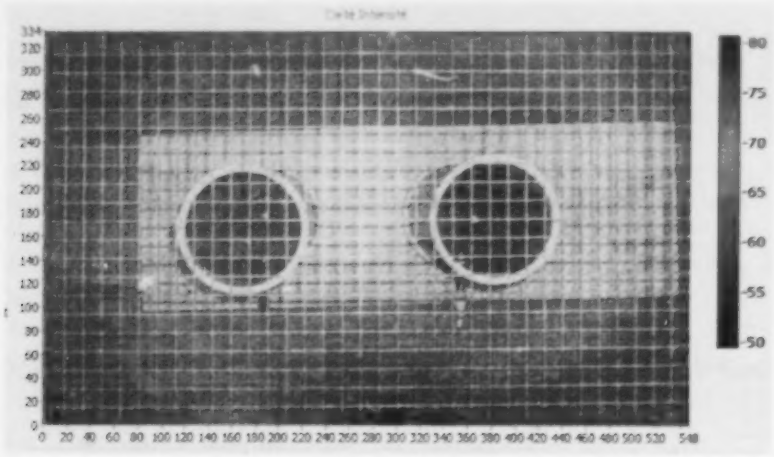


Figure 32 : Cartographie totale

À partir du spectre d'intensité à la Figure 33, on observe l'émergence à environ 67 dB(A) et 69 dB(A) des tons purs à 250 Hz et à 1 000 Hz. À partir de ces informations, on peut investiguer plus loin au niveau de la cartographie en allant observer le rayonnement acoustique à ces fréquences.

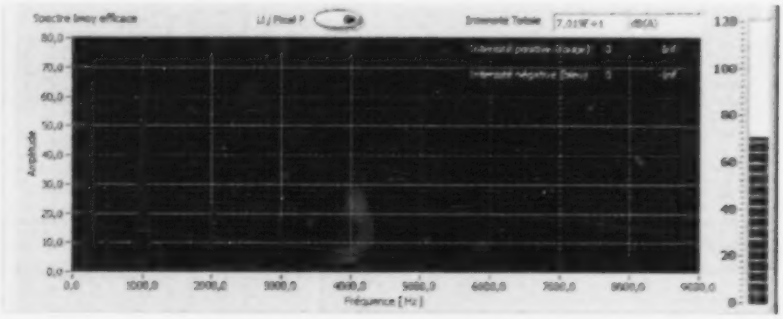


Figure 33 : Spectre d'intensité moyenne

En effet, sur la Figure 34 on perçoit clairement le rayonnement circulaire de l'intensité en provenance du tube de gauche. Les maximums d'intensité autour de 70 dB sont localisés à la sortie du tube.

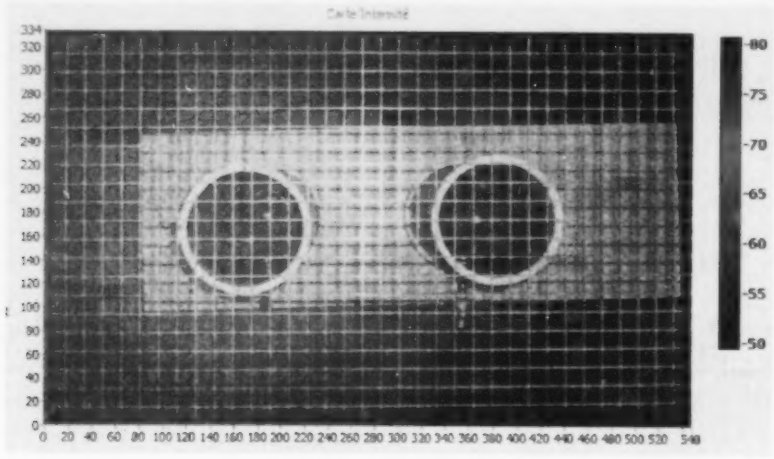


Figure 34 : Cartographie à 250 Hz

En poussant l'investigation à la composante tonale à 1 000 Hz, la Figure 35 affiche la propagation de l'intensité à cette fréquence. Le point chaud du rayonnement (à environ 75 dB(A)) est situé à la sortie du tube de droite et se propage circulairement autour de cette source.

On remarque une onde verte de rayonnement qui passe au-dessus de la sortie du tube de gauche. Sans avoir investigué plus loin sur la présence de ce rayonnement, on peut supposer un phénomène acoustique lié au local réverbérant et/ou au couplage du 1 000 Hz généré avec une des harmoniques du 250 Hz.

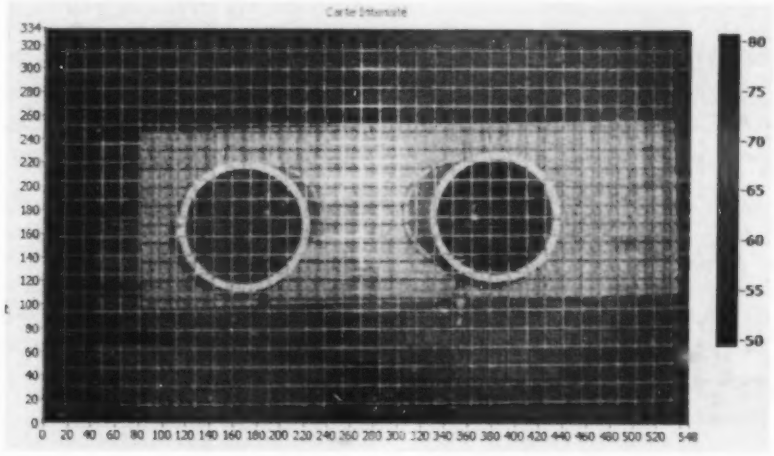


Figure 35 : Cartographie à 1 000 Hz

En résumé, à partir de la mesure de cartographie, il est possible d'identifier avec précision le rayonnement de l'intensité acoustique en fonction de la fréquence sur un plan possédant plusieurs

sources sonores. L'investigation en fréquence permet de bien identifier l'origine de la génération de chacune de ces composantes tonales.

9. AVANTAGES ET LIMITATIONS

Le Tableau 11 dresse les principaux avantages et les limitations relatives au développement de l'intensimètre à faible coût et de l'exploration d'une cartographie de l'intensité acoustique.

Tableau 11 : Résumé des avantages et limitations

	Description
Avantages	- Réalisation d'un intensimètre à faible coût (moins de 10 000 $) - Mesure d'intensité valide à 2 dB près de 35 Hz à 7 000 Hz - Perception visuelle du rayonnement acoustique - Calcul intégré de la puissance acoustique - Guidage automatisé de l'utilisateur - Augmentation de la reproductibilité des mesures
Limitations	- Intensimètre non conforme à la normalisation de type 1 - Système de positionnement : 1) Coût de 4 500 $ US 2) Portée du système limitée à ±1,5 m 3) Précision du positionnement sensible aux perturbations électromagnétiques 4) Dépendance à une technologie développée externe au système Proportion importante du temps de traitement sur le PC : 1) Délai de communication entre deux cartes et le PC 2) Vitesse de calcul limitée sur le PC

10. RETOMBÉES

CSST

L'intensimètre devient plus accessible aux intervenants en acoustique. Tout d'abord, le coût de revient de l'équipement est plus accessible à moins de 10 000 $. De plus, l'interface permettant l'utilisation de l'équipement est simplifiée pour être plus conviviale envers les utilisateurs.

SCIENTIFIQUES

Une demande de brevet pour la cartographie d'intensité acoustique par balayage sera déposée au bureau des brevets.

Une conférence sur les développements du système d'intensité à faible coût et les techniques de correction de la mesure a été présentée au LEA de l'Université de Poitiers le 1er juin 2004.

Un article sera présenté dans un journal scientifique en 2005.

Le projet s'est déroulé dans le cadre de la formation à la maîtrise de M. Michel Pearson, étudiant en génie électrique de l'Université Laval. Un mémoire de maîtrise sera donc rédigé à cet effet.

INDUSTRIE

L'accès à un intensimètre permet un meilleur diagnostic des problématiques de bruit et, par conséquent, une meilleure rentabilité au niveau des traitements acoustiques.

TRAVAILLEURS

Indirectement, l'amélioration de l'environnement sonore des travailleurs par une meilleure identification des problématiques reliées au bruit.

11. CONCLUSION

Le projet a permis le développement d'un intensimètre à faible coût utilisant une technologie DSP et des microphones distribués à grande échelle. Cet outil de diagnostic essentiel pour un plan d'intervention efficace en industrie devient accessible pour une fraction du prix du marché actuel.

De plus, les travaux ont permis de réaliser des cartographies d'intensité acoustique par une technique de balayage. Par rapport aux autres méthodes de cartographie qui sont réservées pour les mesures en laboratoire, notre approche permet d'effectuer des diagnostics de bruit directement en industrie.

Les principaux concepts reliés à l'intensimétrie et au traitement du signal ont été approfondis pour mieux comprendre les limitations physiques du système et les corrections possibles des phénomènes perturbateurs.

Le matériel pour le projet a été sélectionné pour respecter les besoins de l'application au point de vue technologique tout en limitant le prix de revient des composantes.

Les cartes d'acquisition et de traitement du signal, autant du point de vue acoustique que du repérage, ont été intégrées au logiciel principal d'intensimétrie par l'adaptation des pilotes de communication. Le traitement des données et la plupart des calculs ont été développés pour être effectué sur le PC.

L'interface a été simplifiée afin de mieux répondre aux besoins industriels. Avec une brève formation, l'outil peut être maîtrisé rapidement par l'intervenant et permettre des mesures d'intensité sans se perdre dans une panoplie d'options destinées aux laboratoires de recherche.

Parmi les deux prototypes de sonde étudiés, la sonde P2 avec les microphones en configuration face à face a été sélectionnée. Cette sonde donne les meilleurs résultats au niveau de la mesure d'intensité en

prenant soin de modifier l'effet des diffractions autour des microphones. En effet, une technique de correction de la diffraction a été développée pour cette sonde avec l'ajout d'un embout autour des deux microphones.

Les imperfections reliées au déphasage des chaînes microphoniques (microphone et préamplificateur) ont été corrigées à l'aide d'une procédure de correction automatisée. Cette méthode a été testée avec deux modèles de calibrateur, soit le coupleur B&K et le tube à terminaison anéchoïque. La méthode retenue est celle du tube à terminaison anéchoïque à cause de son faible coût du montage et de la possibilité de correction en haute fréquence (jusqu'à 4 200 Hz dans notre cas).

Les mesures d'intensité obtenues avec la procédure d'étalonnage et la correction de la diffraction sont précises à 2 dB près de 35 Hz à 7 000 Hz. Cette précision est suffisante dans un contexte industriel où le but est d'identifier la puissance acoustique des sources.

En utilisant le module de cartographie, on obtient des mesures d'intensité spatiale très convaincantes. Ces cartes d'intensité permettent de reconnaître les fortes zones de rayonnements acoustiques sur une surface définie par l'utilisateur et même d'identifier le rayonnement d'une fréquence bien précise. Les cartes obtenues facilitent l'interprétation du phénomène acoustique pour un non-initié.

12. PERSPECTIVES

Le système actuel est prometteur, mais bénéficierait d'un travail supplémentaire afin d'optimiser certains aspects du système et de pallier à certaines lacunes.

DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE POSITIONNEMENT

Avec le système de positionnement, l'étape suivante consisterait à évaluer et à quantifier expérimentalement les limites du système en diverses conditions de mesure. Entre autres, mesurer l'influence de différents champs électromagnétiques près de la surface balayée.

À partir des limites obtenues pour le système de positionnement, il serait alors possible de choisir de travailler avec un système électromagnétique ayant une plus forte puissance d'émission ou sinon, orienter le guidage de la sonde avec une autre technologie de positionnement. En effet, le développement d'un système de guidage par ultrasons ou par faisceaux optiques permettrait de pallier à certaines lacunes comme la sensibilité aux champs électromagnétiques.

COMMERCIALISATION ET FONCTIONNALITÉ

Le fait d'utiliser un PC et deux cartes électroniques rend le système complet encombrant à une utilisation industrielle. Il serait important, maintenant que le fonctionnement du système est validé, d'intégrer l'appareillage DSP en format portatif. Les calculs, l'acoustique et le système de positionnement pourraient être transférés dans un seul appareil à écran tactile.

Le côté ergonomique du système pourrait aussi être amélioré afin de rendre le poids, la géométrie du système (boîtier et poignée) adaptés à un usage industriel.

VALIDATION

Une validation s'avère nécessaire une fois tout le système revu et corrigé. En effet, des tests en industrie seraient nécessaires afin de vérifier la qualité et la fiabilité du système. Cette phase devrait inclure aussi des modifications éventuelles à partir des observations faites par les utilisateurs.

Bibliographie

[1] *La mesure d'intensité acoustique*, notes de cours *Vibration et acoustique II*, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, avril 1998, p. 1-17.

[2] NICOLAS, J., et G. LEMIRE. "Precision of active sound intensity measurements in a progressive and a non-progressive field", *J. Acoust. Soc. Am.*, 78 (2), August 1985, p. 414-9.

[3] Chung, J.Y. "Fundamental aspect of the cross-spectral method of measuring acoustic intensity", *Proceedings of the International Congress on Acoustic Intensity*, M. Bockhoff, Centre Technique des Industries Mécaniques, Senlis, France, 1981, p. 1-10.

[4] Fahy, F.J. "Sound Intensity", 2^{e} éd., London, Chapman & Hall, 1995.

[5] Patrat, J.-C., et K. Belefqih. « Intensimétrie acoustique à l'aide de matériel non spécialisé : problèmes d'étalonnage », *Proceedings of the Second International Congress on Acoustic Intensity*, M. Bockhoff, Centre Technique des Industries Mécaniques, Senlis , France, 1985, p. 31-8.

[6] Gade, S. "Sound Intensity (Theory)", *Technical review*, Brüel & Kjaer, No. 3 1982.

[7] Seybert, A.F. "Confidence limit and random error for acoustic intensity measurement", *Proceedings of the International Congress on Acoustic Intensity*, M. Bockhoff, Centre Technique des Industries Mécaniques, Senlis, France, 1981, p. 21-4.

[8] Belefqih, K. « Étude et mise en œuvre d'un dispositif de mesure de l'intensité acoustique », Thèse Docteur-Ingénieur, Université de Poitiers, France, 1985.

[9] Max. J. « Méthodes et techniques du traitement du signal et applications aux mesures physiques Tome 1 », 4e éd., Paris, Masson, 1985.

[10] Bruel & Kjaer, «Noise Source Identification». *Site B&K*, [En ligne]. http://www.bksv.com/pdf/Bp1908.pdf (page consultée le 20 janvier 2005)

[11] Bruel & Kjaer, «Non-stationary STSF». *Site B&K*, [En ligne]. http://www.bksv.com/pdf/bp1726.pdf (page consultée le 20 janvier 2005)

[12] Christensen, J.J. et Hald, J. "Beamforming", *Site B&K*, [En ligne]. Technical Review No. 1 (2004) http://www.bksv.com/pdf/Bv0056.pdf (page consultée le 20 janvier 2005)

[13] Patrat, J.C. et al., "Application d'une technique de localisation acoustique à l'établissement d'une cartographie d'intensité acoustique", Congrès Français d'Acoustique, Lille, France, 2002

[14] NBN EN ISO 9614-1 ' 1993 : Acoustique - Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit - Partie 1 : Mesurages par points. '

[15] NBN EN ISO 9614-2 ' 1996 : Acoustique - Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit - Partie 2 : Mesurages par balayage. '

[16] Ascension technologie, «Flock of birds». *Site Ascension technologie*, [En ligne]. http://www.ascension-tech.com/products/classb.php (page consultée le 20 janvier 2005)

[17] White, Paul, «Le microphone». [En ligne]. http://www.chez.com/theatretec/Son/micro.html (page consultée le 24 janvier 2005)

[18] Nixon, M.A. et al, "The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers", Presence, Vol.7, No.2, April 1998, pp. 204-218

[19] Murry, Herschell F., «AC & Pulsed DC Motion Trackers». *Site Polhemus*, [En ligne]. http://www.polhemus.com/ACDCpaper.htm (page consultée le 20 janvier 2005)

[20] Popovic, Z., Popovic, Branko D. "Introductory Electromagnetics", London, Prentice Hall, 2000, p. 248-249.

ANNEXE A SURVOL DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE

MÉTHODE 1

La sonde d'intensité 2D standard (ou l'antenne multi-microphonique) avec un système de guidage robotisé [10]. Dans cette méthode, l'utilisation d'un robot et d'un contrôleur sont nécessaires afin de déterminer la séquence de point [14] ou de balayage [15] à effectuer avec la sonde. Cette méthode exige un système mécanique lourd et encombrant qui rend la mesure en industrie difficile, voire impossible. Cet équipement est donc réservé à l'utilisation *in situ* pour les laboratoires de recherche. Le coût d'un système complet 2D pour une surface de 25 m^2 oscille autour de 100 000 $CAN. L'emploi d'une antenne multi-microphonique avec cette méthode rend le coût du système plus onéreux en raison de l'utilisation de plusieurs microphones et d'un système d'acquisition ayant un nombre d'entrées proportionnel à la quantité de microphones utilisés.

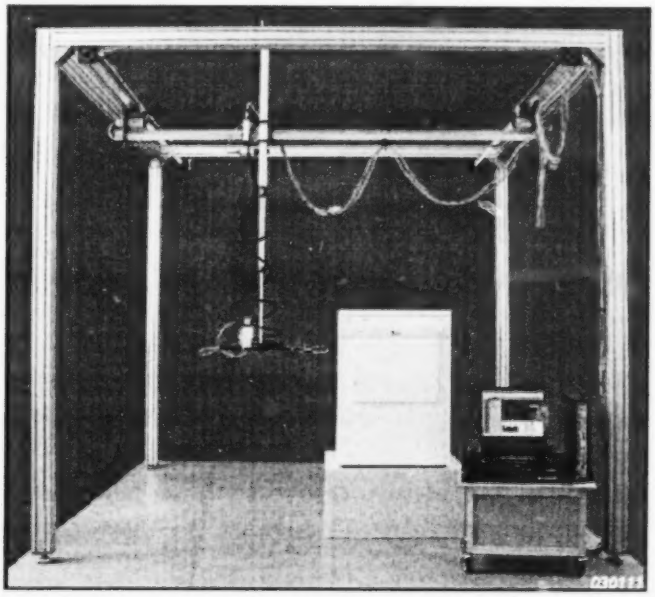


Figure 36 : Sonde d'intensité avec guidage robotisé (source: [10])

MÉTHODE 2

Méthode NAF (near-field acoustic holography) stationnaire et non stationnaire qui utilise une antenne multi-microphonique (voir Figure 37) [10]. Cette méthode consiste à effectuer une cartographie avec une antenne en champ proche basée sur la transformation spatiale du champ d'ondes planes. Le système proposé par B&K se limite aux fréquences sous 3 kHz en mode de mesure des ondes non stationnaires et à 5 kHz en mode stationnaire. Le système NAF stationnaire peut aussi être couplé à un robot et un contrôleur pour la gestion de la position. L'antenne typique illustrée à la Figure 37 utilise 120 microphones et un système d'acquisition imposant qui rend cet équipement réservé aux mesures en laboratoire. Le prix d'un système non stationnaire à 36 canaux est d'environ 230 000 $CAN. De plus, la

calibration de cette antenne devient aussi beaucoup plus longue étant donné que la calibration en amplitude de tous les microphones doit être effectuée avant et après chaque série de mesures.

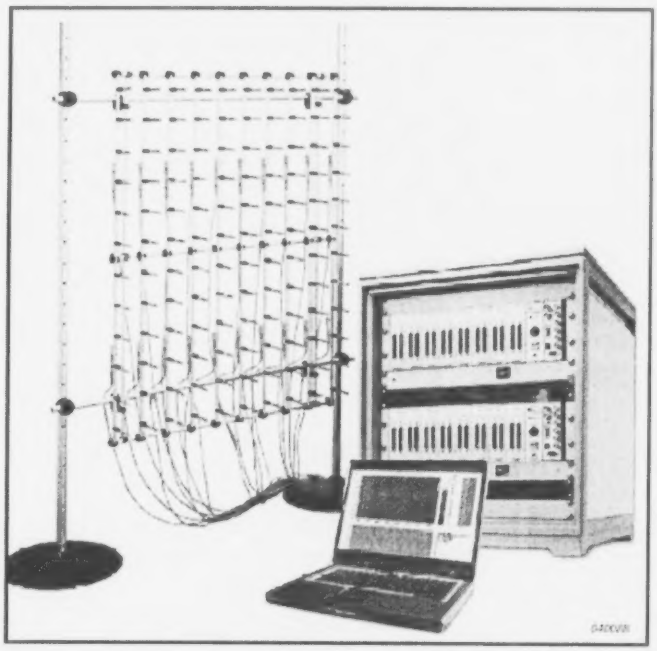


Figure 37 : Système d'acquisition NAH de B&K (source : [11])

MÉTHODE 3

Méthode dites de "beamforming" qui utilise une antenne multi-microphonique (voir Figure 38) constituée typiquement de 64 à 128 microphones [12]**.** La cartographie avec cette méthode donne des indications sur les zones de fort rayonnement. Cette technique ne donne aucun renseignement sur l'intensité acoustique ainsi que sur la puissance des sources. L'antenne doit être orientée en champ lointain (3 à 7 m) face à la zone d'évaluation et limite ainsi l'utilisation dans plusieurs environnements industriels généralement encombrés. Le coût d'un système à 42 canaux est d'environ 200 000 $CAN. Le problème de calibration se pose tel que dans la technique NAF.

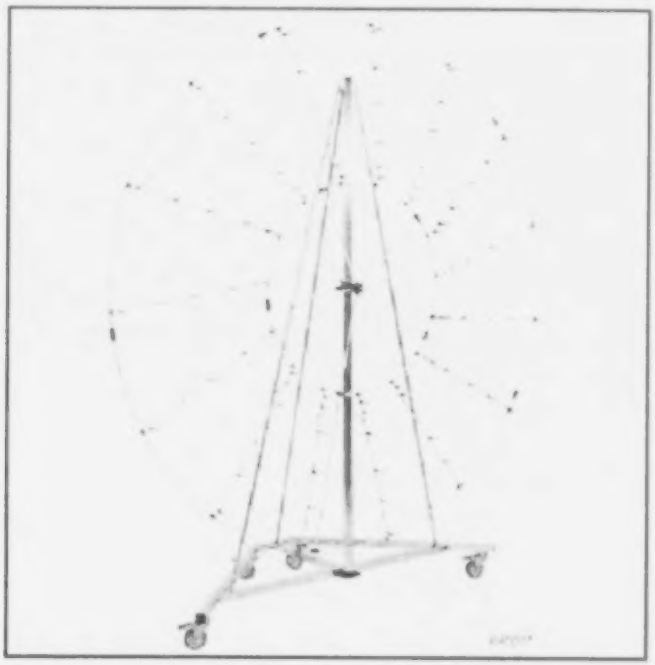


Figure 38 : Antenne multi-microphonique B&K pour le beamforming (source : [12])

MÉTHODE 4

Méthode de cartographie point par point avec repère spatial acoustique [13]. Le repère spatial est une antenne de 4 haut-parleurs (voir Figure 39) qui émettent un signal de référence à chaque point de mesure [14] pour évaluer les coordonnées spatiales de la sonde. La sonde d'intensité 3D permet d'évaluer un vecteur d'intensité, le retard des signaux sonores de référence et de calculer la position de mesure. L'information sur l'intensité acoustique est ensuite acquise et associée à la mesure de position. Le processus est répété pour tous les points prédéfinis par l'utilisateur. Les problèmes rencontrés avec cette technique résident dans le transport et la disposition de l'antenne de haut-parleur dans des endroits encombrés en industrie. Les obstacles entre les haut-parleurs et la sonde affecteront les mesures. Les réflexions et les sources extérieures de bruit peuvent introduire de fausses mesures de position. De plus, il est essentiel de travailler avec une sonde d'intensité 3D à 6 microphones pour obtenir la position et l'orientation de la sonde. La technique point par point est très peu utilisée en industrie en raison du temps de mesure qui est beaucoup plus long. Cette méthode exige aussi la disposition d'un maillage pour que l'utilisateur repère les points prédéfinis dans l'espace.

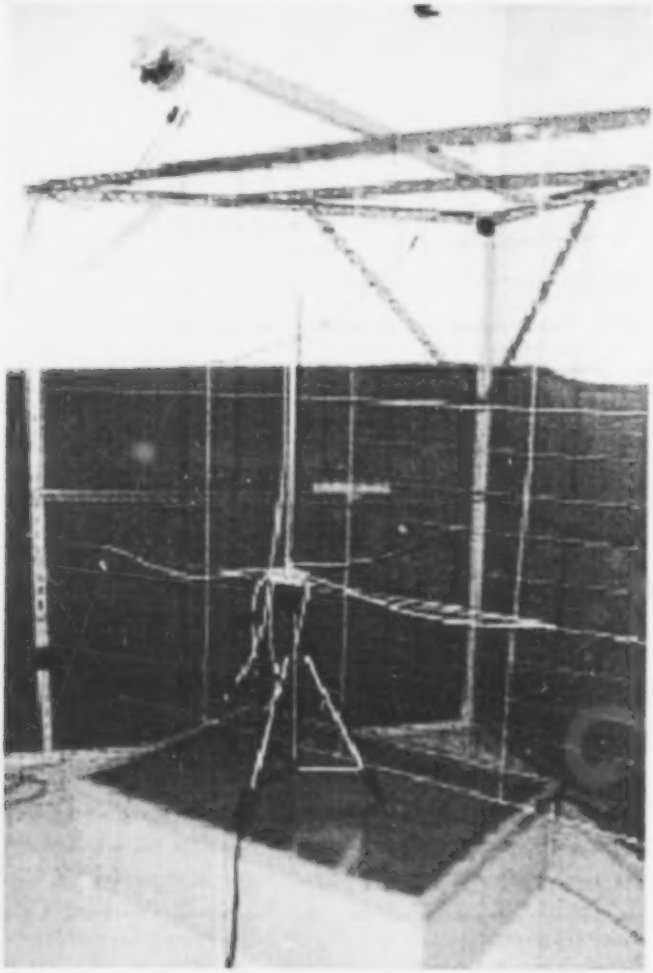


Figure 39 : Système de positionnement spatial acoustique (source : [13])

ANNEXE B PERTURBATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE AVEC FOB

Entre le modèle théorique du rayonnement et la réalité, des perturbations interviennent pour influencer le champ émis par un système de repérage par ondes magnétiques. Au niveau macroscopique, ces perturbations sont reliées :

- Au courant de Foucault[4] induit dans les matériaux métalliques;
- Aux matériaux ferromagnétiques[5] qui possèdent leur propre champ magnétique;
- Aux champs électromagnétiques externes, par exemple, un écran cathodique.

Nixon et al. proposent l'équation (12.1) pour quantifier l'erreur dans le calcul de la position reliée à la présence d'objets ferromagnétiques ou métalliques. Cette équation tient aussi compte des distorsions magnétiques associées aux matériaux ferromagnétiques à haute perméabilité[6]. De cette relation, on peut constater que les matériaux perturbateurs ont intérêt à être éloignés du récepteur et du transmetteur pour augmenter la précision du repérage spatial.

$$\Delta r \propto \frac{d_{tr}^{\ 4}}{d_{tm}^{\ 3} d_{mr}^{\ 3}} \tag{12.1}$$

où :

d_{tr} : distance entre l'émetteur et le récepteur

d_{tm} : distance entre l'émetteur et l'objet perturbateur

d_{mr} : distance entre l'objet perturbateur et le récepteur

Nixon et al. [18] ont quantifié les erreurs associées au système FOB versus le système Fastrack à technologie radio fréquence (RF) de la compagnie Polhemus. D'après leurs résultats, le système à technologie pulsée magnétique est moins précis dans l'ensemble, mais est pratiquement insensible à la présence d'objets métalliques, non ferromagnétiques, près de la zone de mesure. Le repérage avec une technologie RF est perturbé par les bons conducteurs comme le cuivre, l'aluminium, le laiton et certains aciers [19]. L'émetteur vient induire un courant de Foucault dans ces matériaux. Avec la technologie pulsée magnétique, on peut contourner ce problème en augmentant le temps d'acquisition pour laisser plus de temps au phénomène transitoire lié à l'émission pulsée du champ magnétique de se stabiliser avant la mesure (voir Figure 40).

---

[4] Courant de Foucault : Courant induit dans un matériel conducteur par un champ électromagnétique variant dans le temps. (source : [20])

[5] Ferromagnétique : Se dit d'une substance telle que le fer, pour laquelle la perméabilité magnétique est très supérieure à 1, et qui conserve une aimantation rémanente en l'absence de champ magnétique. (En plus du fer, le nickel, le cobalt sont dans ce cas, ainsi qu'un certain nombre d'alliages.) (source : [20])

[6] Perméabilité magnétique: Caractéristique de l'aimantation de certaines substances sous l'effet d'un champ magnétique. (source : [20])

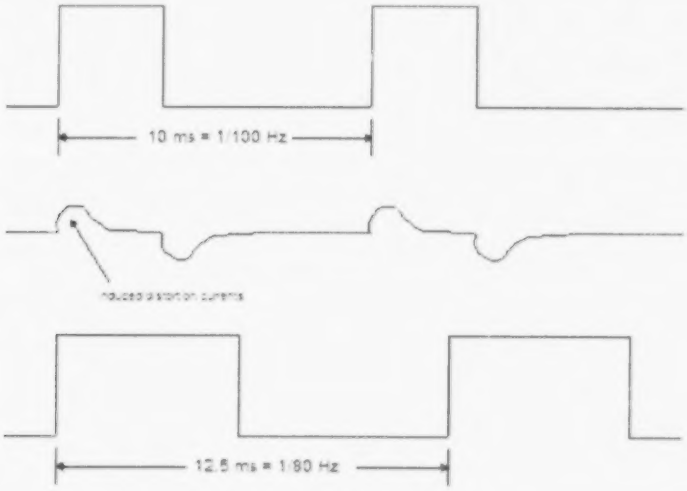


Figure 40 : Augmentation du temps de traitement en fonction du phénomène de distorsion transitoire (source : [19])

Par contre, l'erreur de position du système pulsé magnétique de l'équation (12.1) s'applique avec les objets ferromagnétiques. Voulant mettre en perspective les erreurs observées avec les matériaux ferromagnétiques, Nixon et al. [18] ont effectué un test de positionnement avec un cabinet d'acier (matériel ferromagnétique) de 0,5 m x 0,57 m x 1,5 m de hauteur. La Figure 41 illustre l'erreur observée en fonction de la proximité du cabinet de l'axe émetteur-récepteur. Noter que l'émetteur et le récepteur sont séparés d'une distance de 600 mm. L'erreur de position maximale est de 30 mm dans la condition la plus critique. Pour une surface typiquement balayée de 750 mm, l'erreur relative sur cette mesure est de 4%. Dans la plupart des cas, cette tolérance est suffisante pour la localisation de points chauds de rayonnement acoustique relative à notre application.

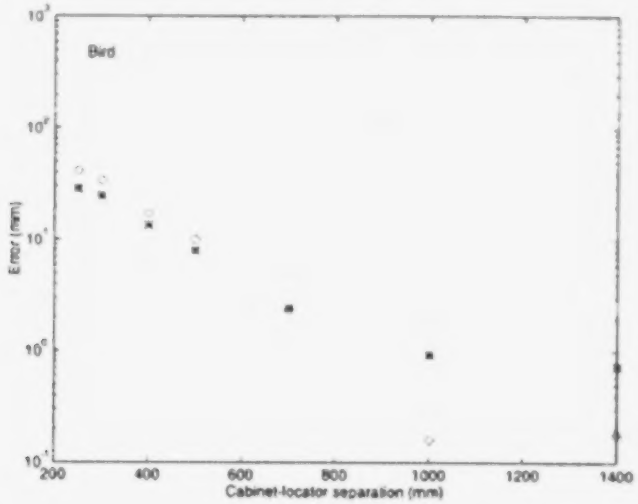


Figure 41 : Effet d'un large cabinet sur l'erreur de position "*" et sur l'erreur de pointage "o" pour le système FOB (source : [18])

Pour ce qui est des perturbations des champs électromagnétiques, la précision des mesures des deux technologies est influencée par ce paramètre et varie aussi en fonction de la fréquence d'acquisition des mesures de position. Nixon et al. suggèrent d'utiliser le filtrage (intégré dans l'équipement) et la synchronisation de la fréquence d'acquisition avec le courant principal du système pour minimiser les effets des champs électromagnétiques perturbateurs. De plus, la compagnie Ascension Technologie propose depuis le 14 décembre 2004 un logiciel qui détecte les fréquences, sur une bande passante de 0 à 3 kHz, qui viennent interférer dans l'environnement de mesure et détermine la fréquence d'opération idéale du système pour éviter les interférences avec les émissions électromagnétiques indésirables. Dans notre cas, le logiciel de détection d'interférence est apparu après la fin des manipulations reliées à la cartographie et n'a pas été utilisé.